

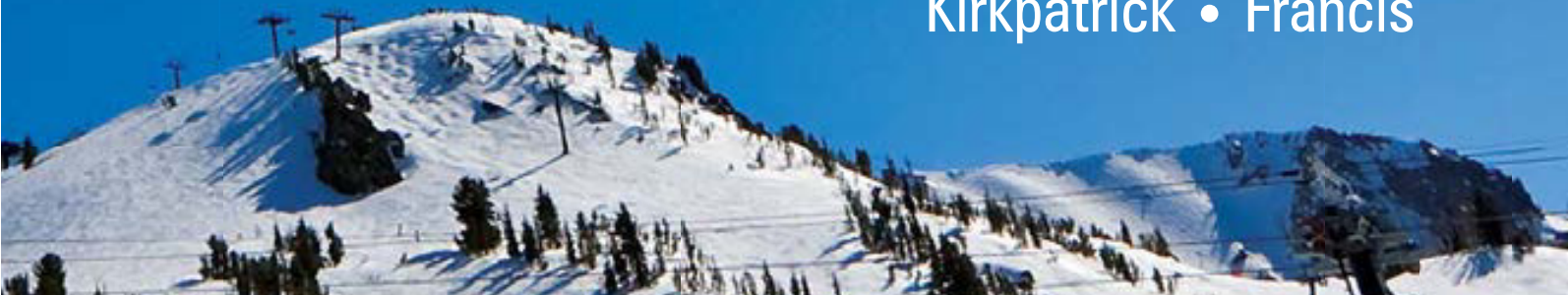


# Física

Una **mirada** al **mundo**

Edición abreviada

Kirkpatrick • Francis



# Física

Una **mirada** al **mundo**

Edición abreviada

# Acerca de los autores



Fotografía de Greg Francis

## LARRY D. KIRKPATRICK

**Larry Kirkpatrick** siempre ha sido un maestro; sólo que no lo sabía. Después de obtener una licenciatura en física en la Washington State University, y una especialidad en física experimental de alta energía en el MIT, comenzó su carrera académica en la University of Washington como un integrante normal del cuerpo docente. Sin embargo, sucedió que cada vez dedicaba más tiempo a las clases y menos tiempo al laboratorio. Por último, decidió que obtendría un empleo de tiempo completo para enseñar física o abandonaría la física y utilizaría sus habilidades en computación para ganar mucho dinero. Por suerte, la Montana State University lo contrató para enseñar física. Se desempeñó durante ocho años como director académico del U.S. Physics Team que compite en la Olimpiada Internacional de Física cada verano y también ha sido presidente de la American Association of Physics Teachers. Dejó esas actividades en 2002 para concentrarse en la enseñanza, la escritura, la ganadería y el golf.



Cortesía de Montana State University

## GREGORY E. FRANCIS

**Greg Francis** es primero, y sobre todo, un maestro. Como estudiante no licenciado en la Brigham Young University, impartía clases de recitación normalmente reservadas para estudiantes graduados. Después, como estudiante graduado que estudiaba física del plasma en el MIT, con regularidad encontró oportunidades para impartir clases normalmente reservadas para maestros investigadores. Después de concluir su doctorado en 1987, se desempeñó como miembro posdoctoral en los Lawrence Livermore National Laboratories. Aunque su posición le permitía colaborar con científicos de clase mundial o con problemas emocionantes, descubrió que en realidad prefería su trabajo nocturno, impartiendo clases de física en una universidad comunitaria del lugar. En 1990, Greg se integró al Physics Education Research Group en la University of Washington-Seattle, para aprender la "ciencia" de la enseñanza eficaz de la física. Desde 1992, Greg ha seguido experimentando con métodos de enseñanza activa en clases de introducción muy concurridas en la Montana State University, en donde en la actualidad es profesor de física.

# Física

Una **mirada** al **mundo**

Edición abreviada



Kirkpatrick • Francis

TRADUCCIÓN

Miguel Martínez Sarmiento

*Traductor Profesional*

REVISIÓN TÉCNICA

Nora Natalia Martínez





**Física: Una mirada al mundo**  
**Edición abreviada**

Larry D. Kirkpatrick y Gregory E. Francis

**Presidente de Cengage Learning**  
**Latinoamérica:**

Fernando Valenzuela Migoya

**Director Editorial, de Producción**  
**y de Plataformas Digitales para**  
**Latinoamérica:**

Ricardo H. Rodríguez

**Gerente de Procesos para**  
**Latinoamérica:**

Claudia Islas Licona

**Gerente de Manufactura para**  
**Latinoamérica:**

Raúl D. Zendejas Espejel

**Gerente Editorial de Contenidos**  
**en Español:**

Pilar Hernández Santamarina

**Coordinador de Manufactura:**

Rafael Pérez González

**Editora:**

Abril Vega Orozco

**Diseño de portada:**

Ivokar creativa

Diseñadora: Gloria Ivonne Álvarez López

Las imágenes utilizadas en la portada fueron utilizadas de conformidad con los términos de servicio de iStockphoto

**Foto de portada:**

iStockphoto

**Composición tipográfica:**

Humberto Núñez

© D. R. 2012 por Cengage Learning Editores, S.A. de C.V., una Compañía de Cengage Learning, Inc. Corporativo Santa Fe Av. Santa Fe núm. 505, piso 12 Col. Cruz Manca, Santa Fe C.P. 05349, México, D.F. Cengage Learning™ es una marca registrada usada bajo permiso.

DERECHOS RESERVADOS. Ninguna parte de este trabajo amparado por la Ley Federal del Derecho de Autor, podrá ser reproducida, transmitida, almacenada o utilizada en cualquier forma o por cualquier medio, ya sea gráfico, electrónico o mecánico, incluyendo, pero sin limitarse a lo siguiente: fotocopiado, reproducción, escaneo, digitalización, grabación en audio, distribución en Internet, distribución en redes de información o almacenamiento y recopilación en sistemas de información a excepción de lo permitido en el Capítulo III, Artículo 27 de la Ley Federal del Derecho de Autor, sin el consentimiento por escrito de la Editorial.

Traducido del libro:

*Physics: A World View, Sixth Edition*

Publicado en inglés por Thomson/Brooks Cole

© 2007

ISBN: 978-0-495-50188-6

Datos para catalogación bibliográfica:

Kirkpatrick, Larry D. y Gregory E. Francis

*Física: Una mirada al mundo. Edición abreviada.*

ISBN: 978-607-481-843-7

Esta edición abreviada es una obra derivada de la creación originalmente publicada por Cengage Learning, *Física: Una mirada al mundo*, sexta edición, de Kirkpatrick, Larry D. y Gregory E. Francis, con ISBN: 978-607-481-297-8 con un total de 688 pp.

Visite nuestro sitio en:

<http://latinoamerica.cengage.com>

Impreso en México

1 2 3 4 5 6 7 15 14 13 12

**DEDICAMOS ESTE LIBRO A:**

**nuestros hijos**

*Jennifer*

*Joshua*

*Monica*

*Heidelinde*

*Peter*

*J. Christian*

*Matthew*

*quienes en maneras muy diferentes nos han enseñado a observar el mundo otra vez,*

**y a nuestras esposas**

*Karen*

*Sandra*

*quienes nos han apoyado en nuestros esfuerzos para explicar la visión del mundo  
de los físicos a nuestros estudiantes.*

# Resumen de contenido



*Prefacio* xxi

- 1** Una visión del mundo 1
- 2** Descripción del movimiento 14
- 3** Explicación del movimiento 33
- 4** Gravedad 56

## **Interludio El descubrimiento de las constantes 75**

- 5** Momento 78
- 6** Energía 93
- 7** Rotación 116
- 8** Estados de la materia 135
- 9** Energía térmica 155
- 10** Electricidad 177
- 11** Corriente eléctrica 200
- 12** Electromagnetismo 220

## **Interludio La historia del cuanto 245**

- 13** Fronteras 248

*Apéndice Laureados Nobel en física* A-1

*Respuestas a casi todas las preguntas y ejercicios  
con números impares* A-5

*Créditos* C-1

*Glosario* G-1

*Índice analítico* I-1

# Contenido

*Prefacio* xxi

## Capítulo 1 Una visión del mundo 1

Ingreso a la escuela 2  
Acerca de la creación de una visión del mundo 2  
Ley de Bode 5  
Medidas 6  
Tamaños: Grande y pequeño 9  
Resumen 12

## Capítulo 2 Descripción del movimiento 14

Rapidez promedio 15  
Imágenes de la rapidez 16  
Rapidez instantánea 18  
Rapidez con dirección 19  
Aceleración 21  
Una mirada inicial sobre los objetos que caen 23  
Caída libre: Creación de una regla de la naturaleza 25  
Comienzo con una velocidad inicial 27  
Un punto sutil 27  
Resumen 28  
**El más rápido y el más lento 19**  
**Galileo: Un genio inmoderado 24**

## Capítulo 3 Explicación del movimiento 33

Una explicación inicial 34  
Los inicios de nuestra explicación moderna 35  
Primera ley de Newton 36  
Suma de vectores 38  
Segunda ley de Newton 40  
Masa y peso 43  
Peso 44  
Diagramas de cuerpo libre 44  
Revisión de caída libre 45  
Galileo contra Aristóteles 46  
Fricción 46



Tercera ley de Newton 47

Resumen 51

**Newton: Brillantez diversificada 37**

**Velocidades terminales 48**

## Capítulo 4 Gravedad 56

El concepto de gravedad 57

Gravedad de Newton 58

La ley de la gravitación universal 61

El concepto de  $G$  62

Gravedad cerca de la superficie terrestre 63

Satélites 65

Mareas 66

¿Qué tan lejos llega la gravedad? 68

El concepto de campo 69

Resumen 70

**Kepler: La música de las esferas 58**

**¿Cuánto pesa usted? 64**

## Interludio El descubrimiento de las constantes 75

## Capítulo 5 Momento 78

Momento lineal 79

Cambio del momento de un objeto 79

Conservación del momento lineal 81

Colisiones 83

Investigación de accidentes 85

Aviones, globos y cohetes 86

Resumen 88

**Aterrizaje complicado: ¡Sin paracaídas! 81**

**Noether: La gramática de la física 87**

## Capítulo 6 Energía 93

¿Qué es la energía? 94

Energía del movimiento 95

Conservación de la energía cinética 96

Cambio en la energía cinética 97

Fuerzas que no trabajan 98

Energía gravitacional potencial 100

Conservación de la energía mecánica 101

Montañas rusas 103

Otras formas de energía 104

¿La conservación de la energía es un engaño? 107





Potencia 109

Resumen 110

**Distancias de paro para automóviles 99**

**Crecimiento exponencial 106**

**Potencia humana 109**

## Capítulo 7 Rotación 116

Movimiento de rotación 117

Torsión 117

Inercia de rotación 120

Centro de la masa 121

Estabilidad 123

Energía cinética de rotación 124

Momento angular 124

Conservación del momento angular 125

Momento angular: Un vector 126

Resumen 128

## Capítulo 8 Estados de la materia 135

Átomos 136

Densidad 136

Sólidos 138

Líquidos 139

Gases 140

Plasmas 141

Presión 141

Hundimiento y flotación 144

Efecto de Bernoulli 146

Resumen 149

**Extremos de densidad 137**

**Líquidos sólidos y sólidos líquidos 143**

**¿Cuánta grasa tiene usted? 147**

**La pelota curva 148**

## Capítulo 9 Energía térmica 155

La naturaleza del calor 156

Trabajo mecánico y calor 157

Revisión de temperatura 158

Calor, temperatura y energía interna 158

Cero absoluto 160

Calor específico 160

Cambio de estado 161

Conducción 164



Convección	166
Radiación	167
Factor de congelación	168
Expansión térmica	169
Resumen	171
<b>Joule: Un genio inmoderado</b>	<b>159</b>
<b>Congelamiento de lagos</b>	<b>171</b>

## Capítulo 10 Electricidad 177

Propiedades eléctricas	178
Dos tipos de cargas	179
Conservación de la carga	180
Atracciones inducidas	181
El electroscope	183
La fuerza eléctrica	185
Electricidad y gravedad	187
El campo eléctrico	188
Líneas del campo eléctrico	190
Potencial eléctrico	192
Resumen	194
<b>Franklin: El Newton estadounidense</b>	<b>181</b>
<b>Relámpago</b>	<b>193</b>

## Capítulo 11 Corriente eléctrica 200

Un descubrimiento accidental	201
Baterías	202
Rutas de conducción	203
Un modelo con agua	204
Resistencia	205
El peligro de la electricidad	207
Un modelo para la corriente eléctrica	207
Un modelo para el voltaje	210
Energía eléctrica	213
Resumen	215
<b>El costo real de la electricidad</b>	<b>212</b>

## Capítulo 12 Electromagnetismo 220

Imanes	221
Corrientes eléctricas y magnetismo	223
Preparación de imanes	224
El ampere	225
La Tierra magnética	227
Partículas cargadas en los campos magnéticos	228



Magnetismo y corrientes eléctricas	229
Transformadores	231
Generadores y motores	232
Una cuestión de simetría	234
Ondas electromagnéticas	235
Radio y TV	238
Resumen	240
<b>Superconductividad</b>	<b>226</b>
<b>Cargador de baterías “inalámbrico”</b>	<b>233</b>
<b>Maxwell: Unificación del espectro electromagnético</b>	<b>237</b>
<b>Transmisiones en estéreo</b>	<b>239</b>

## Interludio    **La historia del cuanto    245**

### Capítulo 13    **Fronteras    248**

Ondas gravitacionales	249
Teorías unificadas	251
Cosmología	252
Radiación de fondo cósmica	254
Materia oscura y energía oscura	255
Neutrinos	256
Los quarks, el Universo y el amor	258
La búsqueda continúa	259
 <i>Apéndice    Laureados Nobel en física</i>	 <i>A-1</i>
<i>Respuestas a casi todas las preguntas y ejercicios con números impares</i>	<i>A-5</i>
<i>Créditos</i>	<i>C-1</i>
<i>Glosario</i>	<i>G-1</i>
<i>Índice analítico</i>	<i>I-1</i>





# Prefacio

Este texto está diseñado para un curso conceptual de introducción a la física para estudiantes que se gradúan en campos diferentes a las ciencias, las matemáticas, o la ingeniería. Funcionará muy bien como curso para futuros maestros.

La redacción de este libro ha sido un ejercicio de traducción. Hemos intentado tomar la lógica, el vocabulario y los valores de la física, y comunicarlos en un lenguaje completamente diferente. Un buen trabajo de traducción requiere una atención cuidadosa de ambos idiomas, el de los físicos y el de los estudiantes. En algunas áreas, la física es tan abstracta que se requieren puentes creativos para cerrar la brecha entre ambos idiomas. Estamos en deuda con numerosos estudiantes que han compartido sus confusiones con nosotros y han luchado con la claridad de nuestras traducciones. Igualmente agradecemos a muchos físicos que buscaron junto a nosotros la palabra o la metáfora adecuada que se acerque más a capturar una idea abstracta y elusiva.

Las matemáticas son la base estructural para la visión del mundo de todos los físicos. Como ya se mencionó, este texto traduce casi todas las ideas en frases más extensas y menos estructuradas. Aún así, las matemáticas sostienen gran parte de la belleza y la fuerza de la física, y pretendemos ofrecer un atisbo de esto a los estudiantes cuyos antecedentes matemáticos son adecuados. Por lo tanto, las presentaciones más matemáticas dentro del texto se han puesto en cuadros denominados *Solución* para hacer el texto más amigable para los estudiantes en cursos que no incluyen este material. Estos cuadros permiten a los estudiantes saltar el material más matemático sin perder la continuidad en el desarrollo de los conceptos de las ideas de la física.

También hemos escrito un suplemento matemático, *Problem Solving to Accompany Physics: A World View* (Solución de problemas relacionados con la física: Una visión del mundo), que ahonda en la estructura matemática de la visión del mundo de la física. Las presentaciones en *Problem Solving* están después de las del texto y las secciones que tienen análisis adicionales en el suplemento se indican mediante un icono de matemáticas, lo cual facilita integrar matemáticas adicionales en el curso. *Este suplemento se encuentra disponible sólo en inglés.*

## Objetivos

El objetivo principal de este texto de física es ofrecer a los estudiantes no orientados a las ciencias una presentación clara y lógica de algunos conceptos y principios básicos de la física, en un lenguaje adecuado. Nuestro interés primordial ha sido elegir temas e ideas para los estudiantes que estudiarán sólo este curso de física. Nunca olvidamos que ésta puede ser nuestra única oportunidad de describir el modo en que los físicos ven el mundo y prueban sus ideas. Elegimos los temas que comunican la esencia de la visión del mundo de la física. Como ejemplo de este interés, hemos puesto más física moderna —específicamente las teorías de la relatividad— en la primera mitad del libro y no al final, como en casi todos los textos tradicionales. También describimos con atención el desarrollo histórico de la física cuántica para mostrar por qué diversos modelos atómicos —modelos que incorporan el sentido común— no explican la evidencia experimental. Al mismo tiempo, hemos intentado motivar a los estudiantes mediante ejemplos prácticos que comprueben la función de la física en otras disciplinas y en sus vidas cotidianas.

**SOLUCIÓN** | Movimiento de proyectil ✓ MATEMÁTICAS

Un gigante hace rodar una bola de boliche con una rapidez uniforme de 30 m/s (aproximadamente 67 mph) sobre su enorme escritorio. La bola llega al extremo del escritorio y aterriza en suelo a una distancia de 120 m de la orilla del escritorio. ¿Cuál es la altura del escritorio?

El movimiento horizontal de la bola permanece constante durante el vuelo; cada segundo que la bola está en el aire, viaja otros 30 m en dirección horizontal. Si la bola viaja 120 m desde la orilla del escritorio antes de aterrizar, debe haber estado en el aire durante 4 s:

$$t = \frac{d}{v} = \frac{120 \text{ m}}{30 \text{ m/s}} = 4 \text{ s}$$

El movimiento vertical de la bola es más complicado. Comienza con una rapidez cero en dirección hacia abajo. Una vez que la bola sale por la orilla del escritorio, está en caída libre y acelera en dirección hacia abajo con una aceleración de 10 m/s<sup>2</sup>. En 4 s, la rapidez vertical cambia de cero a

$$\Delta v = a\Delta t = (10 \text{ m/s}^2)(4 \text{ s}) = 40 \text{ m/s}$$

¿Cuál de estos valores de rapidez, cero o 40 m/s, nos dice qué tan lejos cae la pelota en 4 s? Ninguno. Debemos utilizar la rapidez promedio de 20 m/s. Por lo tanto, la altura del escritorio es

$$h = \bar{v}t = (20 \text{ m/s})(4 \text{ s}) = 80 \text{ m}$$

Las presentaciones de matemáticas se ponen en cuadros *Solución* que pueden pasarse por alto en los cursos que no incluyen matemáticas.

✓ MATEMÁTICAS  
una rapidez uniforme de 30 m/s sobre su enorme escritorio. La bola llega al extremo del escritorio y aterriza en suelo a una distancia de 120 m de la orilla del escritorio. ¿Cuál es la altura del escritorio?

El movimiento horizontal de la bola permanece constante durante el vuelo; cada segundo que la bola está en el aire, viaja otros 30 m en dirección horizontal. Si la bola viaja 120 m desde la orilla del escritorio antes de aterrizar, debe haber estado en el aire durante 4 s:

$$t = \frac{d}{v} = \frac{120 \text{ m}}{30 \text{ m/s}} = 4 \text{ s}$$

✓ El suplemento Problem Solving (Solución de problemas) ofrece una presentación extendida.

El icono de matemáticas indica que *Problem Solving* contiene material matemático complementario.



## Cobertura

El libro comprende dos interludios. Los interludios fijan el tema para las secciones siguientes.

- Los capítulos 1–4 inician con una introducción a la visión del mundo de la física y luego aborda los fundamentos del movimiento, entre ellos las tres leyes de Newton sobre el movimiento. Esta parte concluye con un examen cuidadoso de la gravedad, la fuerza con la que estamos más familiarizados.
- Los capítulos 5–7 reexaminan el movimiento a través de una investigación de tres leyes de la conservación fundamentales: momento, energía y momento angular. En esta parte incluimos el interludio “El descubrimiento de las constantes”.
- En los capítulos 8 y 9 preparamos el escenario para ampliar nuestra comprensión de la materia y la energía térmica.
- Los capítulos 10–12 exploran los conceptos básicos en la electricidad y el magnetismo, entre ellos un examen cuidadoso de los circuitos impresos y la naturaleza de las ondas electromagnéticas.
- La sección final del libro inicia con el interludio “La historia del cuanto” y comprende el capítulo 13, este capítulo lleva al estudiante a ahondar en el estudio de la estructura de la materia al analizar el núcleo y, en algún momento, las partículas fundamentales. Concluye con un análisis de algunas de las fronteras de la física.

## Novedades en esta edición abreviada

Después de solicitar comentarios de maestros de física y estudiantes, consideramos con atención cada sugerencia y utilizamos muchas de ellas para reelaborar todo el texto. Simplificamos las explicaciones de algunos fenómenos; actualizamos áreas en desarrollo e incorporamos explicaciones nuevas.

- También reexaminamos la claridad de cada ilustración para corroborar si cumplía su propósito buscado. Varias docenas se modificaron o se replantearon por completo para eliminar ambigüedades o hacer más evidente el significado. Muchas de las fotografías se cambiaron para mejorar su funcionalidad.
- Revisamos con atención cada pregunta y ejercicio conceptual.

En esta revisión pusimos especial atención en los tres capítulos sobre electricidad, magnetismo y ondas electromagnéticas (capítulos 10-12). Además de las modificaciones en todos estos capítulos para mejorar la claridad de las descripciones y las explicaciones, efectuamos varios cambios más extensos.

- En el capítulo 10, hicimos cambios sustanciales en las secciones Conservación de la carga, El electroscopio, La fuerza eléctrica, Electricidad y gravedad, y Potencial eléctrico. Incluimos una sección nueva sobre líneas del campo eléctrico y agregamos dos preguntas y respuestas nuevas en el texto.
- Cambiamos el nombre del capítulo 11 al más convencional de Corriente eléctrica. La sección sobre baterías y bombillas eléctricas se reformuló extensamente con base en nuestras experiencias y esto se utilizó como el componente de indagación del curso que impartimos en la Montana State University. Las ideas se reorganizaron de un modo más lógico y se amplió el modelo de corriente simple para los circuitos que contienen baterías y bombillas eléctricas para incluir consideraciones del voltaje. Las dos secciones nuevas son Un modelo para la corriente eléctrica y Un modelo para el voltaje. También presentamos la unión de Kirchhoff y las reglas de los circuitos.

- Agregamos al capítulo 12 un nuevo cuadro de características Cargador de baterías “inalámbrico”, como una aplicación práctica del electromagnetismo. Hicimos una cantidad más grande de cambios en las preguntas y los ejercicios conceptuales en los tres capítulos.

Nos emociona mucho el uso de los sistemas personales de respuesta en nuestras clases. Los estudiantes utilizan dispositivos manuales “para hacer clic” para responder a las preguntas planteadas en diapositivas de PowerPoint®. Como algunos ya lo han descubierto, encontramos que los estudiantes aprenden de manera más activa cuando deben responder a las preguntas o a las actividades en clase. También resultaron útiles las gráficas de las respuestas de los estudiantes para hacer cambios en mitad de la clase sobre la dirección de nuestras presentaciones. Hemos desarrollado un extenso conjunto de diapositivas “para hacer clic”, disponibles para quienes adoptan nuestro texto. Para más información, consulte la lista para JoinIn™ en TurningPoint®, en la sección Materiales de apoyo para el instructor, más adelante en este prefacio.



El autor Larry Kirkpatrick ha preparado preguntas probadas en clase para JoinIn™ en TurningPoint®, convenientes para utilizarse con diversos sistemas electrónicos de respuesta “para hacer clic”.

## Rutas temáticas y opciones de enseñanza

Una gran parte del flujo de cualquier curso se apoya en las decisiones del instructor acerca de lo que se va a cubrir. Por esta razón el texto contiene más material del que se puede cubrir en un curso introductorio de un trimestre. Es posible seguir muchas rutas a través del material, dependiendo de sus intereses y los de sus estudiantes. Para ejemplificar algunas posibilidades, hemos compilado seis rutas diferentes que sirven a lo largo de un semestre. Cada ruta temática utiliza cerca de la mitad del material presentado en el texto. Estas seis diferentes opciones de enseñanza (o rutas temáticas) se llaman Ciencia física, Electricidad y magnetismo, Óptica, Energía, Vibraciones y ondas y Partículas elementales.

- *Ciencia física* destaca los temas que son básicos para la física y la química. Después de estudiar el movimiento de los conceptos de momento y energía, esta opción ahonda en la estructura y los estados de la materia, el calor y la termodinámica, las propiedades básicas de las ondas, y concluye con la física atómica.
- En la opción *Electricidad y magnetismo*, comenzamos con el movimiento y los conceptos de momento y energía, pasamos al capítulo de ondas, y después a los tres capítulos sobre electricidad, magnetismo, y electromagnetismo. Concluimos con otros capítulos sobre física atómica.
- La opción *Óptica* también comienza con el movimiento en las ondas. Después cubre casi completos los tres capítulos sobre la luz y concluye con la física atómica.
- El curso para estudiar la *Energía* comienza con el movimiento, el momento, y la energía mecánica. Después cubre los dos capítulos sobre energía térmica y termodinámica. Después del capítulo sobre ondas, el curso pasa a los tres capítulos sobre electricidad y magnetismo, lo cual incluye las ondas electromagnéticas. El curso concluye con un estudio del núcleo y la energía nuclear.
- *Vibraciones y ondas* cubre el movimiento y la energía y después se concentra en las propiedades relacionadas con el electromagnetismo.
- A quienes les interesa la búsqueda de los bloques de construcción definitivos del universo, les sugerimos hacer hincapié en *Partículas elementales*, donde tocamos temas selectos de electricidad.

Hemos detallado estas opciones basadas en temas, en una tabla en el *Instructor's Resource Manual* (ISBN 0-495-01090-1) disponible para los instructores calificados a través de su representante de Cengage Learning o sobre pedido en <http://latino-america.cengage.com/kirkpatrick>.

## Características

Casi todos los instructores coincidirían en que el texto seleccionado para un curso debe ser la principal “guía” de los estudiantes para comprender y aprender la materia. Además, un texto debe redactarse y presentarse para hacer la enseñanza más fácil y comprensible, no más difícil. Con estos puntos en mente, incluimos muchas características pedagógicas para destacar la utilidad de nuestro texto para usted y sus estudiantes.

**Organización** Este texto abreviado contiene un historial acerca de una parte del desarrollo de la visión del mundo de la física actual: por un lado, los fundamentos del movimiento y la gravedad; las leyes de conservación del momento y la energía, el calor y la termodinámica; la electricidad y el magnetismo; la historia del cuanto; y las fronteras. Cada sección incluye un resumen de la materia que va a cubrir y algunas perspectivas históricas.

**Estilo** Hemos escrito el libro en un estilo claro, lógico, y breve para facilitar la comprensión de los estudiantes. El estilo de redacción es bastante informal y relajado, y esperamos que su lectura resulte atractiva y disfrutable para los estudiantes. Los términos nuevos se definen con cuidado, y hemos intentado evitar el argot.

**Nivel matemático** El nivel matemático del texto se ha mantenido en un mínimo, con un uso limitado de álgebra y geometría. Las ecuaciones se presentan en palabras, al igual que en símbolos. Para quienes requieren una presentación matemática más alta, hemos preparado un suplemento matemático, *Problem Solving to Accompany Physics: A World View*, paralelo a los temas del texto, que presenta aspectos matemáticos adicionales sobre el tema. Un icono de matemáticas en el texto indica que hay material suplementario en *Problem Solving*. Este material se encuentra disponible sólo en inglés.

No hemos evitado el uso de números cuando ayudan a desarrollar una comprensión más completa de un concepto. Por otra parte, hemos redondeado los valores de las constantes físicas para simplificar el análisis. Por ejemplo, utilizamos 10 (metros por segundo) por segundo para la aceleración debida a la gravedad, excepto al analizar la ley de la gravitación universal, en donde se requiere una precisión adicional para comprender su desarrollo.

**Solución** Las presentaciones más matemáticas se han colocado en cuadros *Solución*. Estas funciones permiten a los estudiantes seguir una senda más matemática para obtener dicha información con facilidad, al mismo tiempo que permiten a los demás pasar por alto este material matemático sin perder la continuidad. Por ejemplo, consulte “Aceleración” en la página 23, o “Conservación de la energía cinética” en la página 97.

**Preguntas y respuestas de razonamiento defectuoso** Estas preguntas se basan en la investigación sobre educación en física y resaltan temas en los cuales se sabe que los estudiantes tienen percepciones erróneas y/o dificultades para captar los conceptos. Están escritas en un estilo más casual para que los estudiantes se sientan más cómodos al enfrentar sus percepciones erróneas y dificultades. En la página 121 vea un ejemplo de una pregunta y una respuesta de razonamiento defectuoso.

**Ilustraciones** La gran cantidad de figuras, diagramas, fotografías, y tablas mejoran la legibilidad y la eficacia del material del texto. Se aplica color para agregar claridad a las ilustraciones y aportarles realismo. Por ejemplo, se aplica una codificación de color a los vectores por cada cantidad física. Se producen efectos tridimensionales con el uso de color y áreas difuminadas, en donde resulta adecuado. Muchas de las ilustraciones muestran el desarrollo de un fenómeno durante el tiempo como una serie de “instantáneas”. Para ejemplificar el flujo del tiempo hemos agregado un icono de reloj (🕒) en estos dibujos. Las fotografías en color se han



### Razonamiento defectuoso

La pregunta siguiente aparece en un examen final: “Tres osos lanzan rocas idénticas desde un puente hacia un río que está debajo. Papá Oso lanza su roca hacia arriba en un ángulo de 30 grados sobre la horizontal. Mamá Osa lanza la suya de manera horizontal. Bebé Oso lanza la roca en un ángulo de 30 grados bajo la horizontal. Suponiendo que los tres osos lanzan con la misma rapidez, ¿cuál roca viajará más rápido cuando llegue al agua?” Tres estudiantes se reúnen después del examen y analizan sus respuestas.

**Emma:** “La roca de Bebé Oso irá más rápido porque empieza con un componente de velocidad hacia abajo.”

**Héctor:** “Pero la roca de Papá Oso permanecerá más tiempo en el aire, por lo que tendrá más tiempo para acelerar. Creo que su roca será la que viaje más rápido.”

**M'Lynn:** “La roca de Papá Oso permanece más tiempo en el aire, pero parte de ese tiempo se mueve hacia arriba y frena. Creo que la roca de Mamá Osa viajará más rápido cuando toque el agua porque está más tiempo en el aire que la de Bebé Oso y acelera todo el tiempo.”

¿Con la respuesta de cuál estudiante está usted de acuerdo?

**Respuesta** Los tres estudiantes están equivocados. Vuelven muy difícil un problema fácil al ignorar el poder del método de la energía para resolverlo. Debido a que cada una de las tres rocas comenzó con la misma energía cinética (misma rapidez y la misma energía gravitacional potencial (misma altura), todas deben terminar con la misma energía cinética final antes de chocar con el agua. Por lo tanto, las tres rocas deben tocar el agua con la misma rapidez. Observe que las tres rocas no tocarán el agua al mismo tiempo, ni con la misma velocidad, ni desde la misma distancia del puente. Sin embargo, el método de la energía no nos dará esta información.

Los cuadros Razonamiento defectuoso resaltan y corrigen percepciones erróneas comunes.

elegido con cuidado, y sus leyendas sirven como un recurso educativo adicional. Una descripción completa del uso pedagógico del color aparece al final del libro.

**Preguntas y respuestas de inicio de capítulo** Cada capítulo comienza con una indagación que se responde al final del mismo. Esto concentra la atención del estudiante en un aspecto importante de cada tema.

**Preguntas y respuestas dentro del texto** En lugares importantes en cada capítulo se incluyen preguntas para estimular el razonamiento y se destacan mediante una pantalla en color. Estas preguntas permiten a los estudiantes probar de inmediato su comprensión de los conceptos analizados. Las respuestas están inmediatamente después de cada pregunta. Casi todas las preguntas también sirven como base para iniciar discusiones en el aula.

**Preguntas y ejercicios conceptuales** Al final de cada capítulo se incluye un extenso grupo de preguntas y ejercicios conceptuales. Casi todas las preguntas y ejercicios se presentan en pares, lo que significa que inmediatamente después de cada pregunta o ejercicio con número impar aparece uno similar con número par. Esta correlación también le permite analizar un ejercicio en clase y asignar su “socio” como tarea. También hemos incluido un número reducido de preguntas y ejercicios desafiantes, los cuales se indican mediante un icono ▲ impreso junto al número. Las respuestas a las preguntas y ejercicios con número impar se ofrecen al final del libro. Las respuestas a todas las preguntas y soluciones para todos los ejercicios se incluyen en el *Instructor's Resource Manual* que se vende por separado.

**Física Hágalo usted mismo** Cada capítulo contiene varios proyectos y experimentos sencillos para que los estudiantes los realicen solos. Los proyectos se han diseñado para requerir un mínimo de instrumentos y para ejemplificar los conceptos presentados en el texto. Ilustran los aspectos experimentales de la física y la aplicación de la física en nuestras vidas cotidianas.

**Cuadros de Tema especial** Casi todos los capítulos incluyen cuadros con un tema especial opcional, para exponer a los estudiantes a diversas aplicaciones prácticas e interesantes de los principios de la física. Algunos de los temas especiales son las velocidades terminales, el crecimiento exponencial, la densidad, los relámpagos, la superconductividad y los cargadores de baterías “inalámbricos”.

**Bosquejos biográficos** Además de las perspectivas históricas ofrecidas en los interludios, hemos incorporado algunas biografías breves de científicos importantes en todo el texto, para ofrecer un énfasis histórico más definido sin interrumpir el desarrollo de los conceptos de la física.

**Conceptos importantes** Las afirmaciones y ecuaciones importantes se resaltan de diversas maneras para su consulta y repaso fáciles.

- Se utilizan notas al margen para resaltar afirmaciones, ecuaciones, y conceptos importantes del texto.
- Cada capítulo concluye con un resumen que repasa los conceptos y los términos importantes del capítulo.

**Unidades** En todo el texto se utiliza el sistema internacional (SI) de unidades. El sistema de unidades que se acostumbra en EUA (el sistema convencional) se emplea en un grado limitado en los capítulos sobre mecánica y calor, para ayudar a los estudiantes a captar mejor las unidades del sistema SI.

**Apéndice** Un apéndice al final del texto lista los laureados Nobel en física.

**Anexos** En las páginas finales del libro aparecen tablas de datos de la física y otra información útil, como las constantes fundamentales, las abreviaturas de unidades estándar, los datos físicos, los factores de conversión, el alfabeto griego, el código de colores para todas las figuras y diagramas y la tabla periódica.

**Nota importante:**

Debido a que este material consiste en una obra adaptada, la numeración de los capítulos no será la misma que en los materiales de apoyo que se venden por separado.

Para darle continuidad y que usted cuente con una referencia precisa cuando adquiera alguno de nuestros productos complementarios que acompañan al libro *Física. Una mirada al mundo*, sexta edición, ISBN: 978-607-481-297-8, a continuación referenciamos la numeración de los capítulos que contiene el libro original.

**Capítulo 1** Una visión del mundo

**Capítulo 2** Descripción del movimiento

**Capítulo 3** Explicación del movimiento

**Capítulo 4** Movimientos en el espacio

**Capítulo 5** Gravedad

**Interludio El descubrimiento de las constantes**

**Capítulo 6** Momento

**Capítulo 7** Energía

**Capítulo 8** Rotación

**Interludio Universalidad del movimiento**

**Capítulo 9** Relatividad clásica

**Capítulo 10** La relatividad de Einstein

**Interludio La búsqueda de los átomos**

**Capítulo 11** Estructura de la materia

**Capítulo 12** Estados de la materia

**Capítulo 13** Energía térmica

**Capítulo 14** Energía disponible

**Interludio Ondas: Otra cosa que se mueve**

**Capítulo 15** Vibraciones y ondas

**Capítulo 16** Sonido y música

**Interludio El misterio de la luz**

**Capítulo 17** Luz

**Capítulo 18** Refracción de la luz

**Capítulo 19** Un modelo para la luz



## Interludio Un mundo eléctrico y magnético

- Capítulo 20** Electricidad  
**Capítulo 21** Corriente eléctrica  
**Capítulo 22** Electromagnetismo

## Interludio La historia del cuanto

- Capítulo 23** El átomo inicial  
**Capítulo 24** El átomo moderno

## Interludio El mundo subatómico

- Capítulo 25** El núcleo  
**Capítulo 26** Energía nuclear  
**Capítulo 27** Partículas elementales  
**Capítulo 28** Fronteras

## Materiales de apoyo para el estudiante

*Problem Solving to Accompany Physics: A World View* (ISBN 0-495-01093-6) Este suplemento matemático, codificado para el texto, desarrolla algunos de los aspectos numéricos de este curso que se pueden abordar con álgebra y geometría simples. Las secciones del texto que tienen una presentación paralela extendida en *Problem Solving* se indican mediante un icono de matemáticas a la derecha del título de la sección. El suplemento contiene un análisis matemático adicional para estas secciones y problemas numéricos adicionales al final del capítulo, con respuestas para los números impares en un apéndice.

*Este material se encuentra disponible sólo en inglés.*



## Materiales de apoyo para el instructor

Los instructores calificados deben comunicarse con su representante local de Cengage Learning para obtener ejemplares de lectura. Visite <http://latinoamerica.cengage.com/kirkpatrick> para localizar un representante o solicitar ejemplares de prueba en línea.

**Instructor's Resource Manual (ISBN 0-495-01090-1)** El *Instructor's Resource Manual* fue escrito por los autores y contiene respuestas y soluciones para todas las preguntas y ejercicios del texto y todos los problemas del suplemento *Problem Solving*. Ofrece sugerencias de enseñanza e información sobre la integración de demostraciones en su disertación para cada capítulo, y resúmenes del curso que ayudan a determinar cuáles secciones incluir en los cursos temáticos que no incorporan todos los capítulos.

*Este material se vende por separado y se encuentra disponible sólo en inglés.*

**JoinIn™ en TurningPoint® para sistemas electrónicos de respuestas (ISBN 0-495-01099-5)** Cengage Learning ahora ofrece contenido de JoinIn probado en el aula para sistemas electrónicos de respuestas escrito por los autores de *Física: Una mirada al mundo*. Estas preguntas instantáneas en clase se relacionan con cada concepto principal y le permiten transformar su aula y evaluar el avance de sus estudiantes conforme usted diserta. Nuestro acuerdo exclusivo para ofrecer el software TurningPoint® le permite plantear preguntas y mostrar las respuestas de los estudiantes sin complicaciones dentro de sus propias diapositivas de PowerPoint, junto con el hardware “para hacer clic” que usted elija. Mejora el modo en que sus estudiantes interactúan con usted, con su disertación y entre ellos. Para conocer más comuníquese con su representante local de Cengage Learning.

*Este material se vende por separado y se encuentra disponible sólo en inglés.*



**CD-ROM Multimedia Manager Instructor (ISBN 0-495-01096-0)** *Multi-media Manager* es una biblioteca digital y herramienta de presentación que ofrece las figuras, las fotografías y las tablas del texto en los formatos electrónicos JPEG y PowerPoint. Esos archivos electrónicos sirven para hacer transparencias y se exportan fácilmente a otros paquetes de software. Este CD-ROM mejorado también contiene funciones que le ayudan a preparar con facilidad disertaciones para la edición nueva. Los grupos completos de diapositivas de PowerPoint del autor Larry Kirkpatrick para cada capítulo son muy convenientes para utilizarse con los sistemas electrónicos de respuesta, y es fácil eliminar o agregar diapositivas para personalizar los grupos de su curso sin invertir mucho tiempo. Se ofrecen animaciones y películas para complementar las disertaciones y se incluyen los archivos electrónicos de diversos suplementos impresos.

*Este material se vende por separado y se encuentra disponible sólo en inglés.*

**Transparencias (ISBN 0-495-01092-8)** El estudiante de física conceptual a menudo tiene dificultades para entresacar toda la información presentada en los diagramas de física. Por lo tanto, se ofrece a los usuarios calificados un conjunto de 100 transparencias a todo color de las figuras importantes del libro.

*Este material se vende por separado y se encuentra disponible sólo en inglés.*

**WebAssign** WebAssign es el sistema de administración de tareas de física más utilizado. Diseñado por físicos para físicos, este sistema es un confiable compañero para su enseñanza. Para obtener una vista previa del contenido de *Física: Una mirada al mundo* en WebAssign visite [www.webassign.net](http://www.webassign.net) o comuníquese con su representante de Cengage Learning para más información.

**Segmentos de video para demostraciones de física** El profesor Clint Sprott de la University of Wisconsin-Madison preparó aproximadamente dos horas de segmentos de videos para demostrar una amplia variedad de sus sencillos experimentos de física en clase para el curso de introducción de la física, desde el movimiento de proyectiles y las leyes de Newton hasta el sonido y la óptica. Los segmentos se ofrecen en sitio web <http://latinoamerica.cengage.com/kirkpatrick>. El *Instructor's Resource Manual* proporciona sugerencias útiles acerca de la integración de los segmentos en sus disertaciones y la repetición de las demostraciones.

## Agradecimientos

Entre los físicos y los maestros de física que han aportado gratuitamente su tiempo para explorar las numerosas opciones para expresar la visión del mundo de la física con un mínimo de matemáticas están nuestros colegas Jeff Adams, John Carlsten, William Hiscock, Robert Swenson, y George Tuthill de la Montana State University, al igual que el extinto Arnold Arons (University of Washington), Larry Gould (University of Hartford) y Bob Weinberg (Temple University). Agradecemos los esfuerzos especiales de David Rogers, experto en fotografía de la Montana State University, para muchas de las fotografías utilizadas en el texto. También queremos agradecer a los numerosos estudiantes que han aprovechado el texto y nos han expresado valiosas opiniones.

Asimismo, estamos en deuda con Gerry Wheeler, quien hace casi 30 años sugirió a Larry Kirkpatrick que escribiera un texto. Ni Larry ni Gerry podían haber escrito un libro por sí solos, pero juntos produjeron un texto que ha tenido un gran éxito en ventas. En el proceso de comprender la física, interactúan con los estudiantes para aprender cómo presentar la física a un público sin conocimientos técnicos, y analizar el mejor modo de capturar en el texto la emoción en impartir enseñanzas, se volvieron mucho mejores maestros de física... y amigos de toda la vida. Gerry es director ejecutivo de la National Science Teachers Association (NSTA), la cual es muy afortunada por contar con su mente creativa y su extraordinaria capacidad para colaborar con las personas en el mejoramiento de la educación en ciencias. Le deseamos que tenga éxito constante.

Los revisores siguientes fueron de gran utilidad para obtener la edición actual:

ELENA BOROVITSKAYA, Temple University  
 MILTON W. COLE, Pennsylvania State University  
 MARTIN HACKWORTH, Idaho State University  
 DOUG BRADLEY-HUTCHISON, Sinclair Community College  
 LOIS BREUR KRAUSE, Clemson University  
 ERNEST MA, Montclair State University  
 PROMOD R. PRATAP, University of North Carolina at Greensboro  
 INA P. ROBERTSON, University of Kansas  
 DANIEL STUMP, Michigan State University  
 D. BRIAN THOMPSON, University of North Alabama  
 MATTHEW M. WAITE, West Chester University of Pennsylvania  
 BONNIE L. WYLO, Eastern Michigan University

Los revisores para la quinta edición fueron:

JAMES ARRISON, Villanova University  
 ORVILLE DAY, East Carolina University  
 DAVID DEMUTH, University of Minnesota, Crookston  
 TINA FANETTI, Western Iowa Technical Community College  
 DOUGLAS S. HAMILTON, University of Connecticut  
 TERESA L. LARKIN, American University  
 ROBERT S. PANVINI, Vanderbilt University  
 MICHAEL ROTH, University of Northern Iowa  
 LAWRENCE WEINSTEIN, Old Dominion University  
 ROBERT A. WILSON, San Bernardino Valley College

Los revisores siguientes ofrecieron muchas sugerencias útiles para la cuarta edición:

JAMES ARRISON, Villanova University  
 LARRY BROWNING, South Dakota State University  
 MICHAEL CREE, University of Waikato, New Zealand  
 ORVILLE DAY, East Carolina University  
 DAVID DONNELLY, Sam Houston State University  
 H. JAMES HARMON, Oklahoma State University  
 CHRISTIAN ILIADIS, University of North Carolina—Chapel Hill  
 RICHARD MCCORKLE, University of Rhode Island  
 IRINA NELSON, Salt Lake Community College  
 ROBERT PACKARD, Baylor University  
 SOKRATES PANTELIDES, Vanderbilt University  
 ALISTAIR STEYN-ROSS, University of Waikato, New Zealand  
 LARA WILCOCKS, University of Waikato, New Zealand  
 ROBERT WILSON, San Bernardino Valley College  
 ROBERT ZBIKOWSKI, Hibbing Community College

Los revisores siguientes aportaron valiosas ideas para la tercera edición:

PHILIP BARINGER, University of Kansas  
 LOUIS CADWELL, Providence College  
 JORGE COSSIO, North Miami—Dade Community College  
 GARY DELEO, Lehigh University  
 MARK MIKSIC, Queens College  
 THOMAS SMITH, Mount San Antonio College  
 GEORGE SMOOT, University of California at Berkeley  
 JAN YARRISON-RICE, Miami University of Ohio

Entre los revisores que desempeñaron una función importante en el desarrollo de la segunda edición del texto están:

JEFFREY COLLIER, Bismarck State Community College  
 LEROY DUBECK, Temple University  
 JOHN R. DUNNING, Jr., Sonoma State University  
 JOSEPH HAMILTON, Vanderbilt University  
 ROGER HERMAN, Pennsylvania State University  
 ROBERT LIEBERMAN, Cornell University  
 RICHARD LINDSAY, Western Washington University  
 ROBERT A. LUKE, Boise State University  
 ALLEN MILLER, Syracuse University  
 JOHN MUDIE, Modesto Junior College  
 STEVEN ROBINSON, Colorado State University  
 CARL ROSENZWEIG, Syracuse University  
 JAMES WATSON, Ball State University

Los revisores de la primera edición, que ayudaron a moldear el contenido y la estructura de la edición actual, son:

JOHN C. ABELE, Lewis & Clark College  
 DAVID BUCKLEY, East Stroudsburg University  
 ROBERT CARR, California State University, Los Angeles  
 ART CHAMPAGNE, Princeton University  
 DAVID E. CLARK, University of Maine  
 ROBERT COLE, University of Southern California  
 JOHN R. DUNNING, Jr., Sonoma State University  
 ABBAS FARIDI, Orange Coast College  
 SIMON GEORGE, California State University, Long Beach  
 PATRICK C. GIBBONS, Washington University  
 ROBERT E. GIBBS, Eastern Washington University  
 TOM J. GRAY, Kansas State University  
 ROGER HANSON, University of Northern Iowa  
 STEVEN HOFFMASTER, Gonzaga University  
 MICHAEL HONES, Villanova University  
 SARDARI L. KHANNA, York College  
 JEAN P. KRISH, University of Michigan  
 DAVID A. KRUEGER, Colorado State University  
 LEON R. LEONARDO, El Camino College  
 ROBERT A. LUKE, Boise State University  
 PETER MCINTYRE, Texas A&M University  
 PAUL NACHMAN, New Mexico State University  
 VAN E. NEIE, Purdue University  
 BARTON PALATNICK, California State Polytechnic University, Pomona  
 CECIL. G. SHUGART, Memphis State University  
 LEONARD STORM, Eastern Illinois University  
 PAUL VARLASHKIN, East Carolina University  
 LEONARD WALL, California State Polytechnic University, San Luis Obispo  
 JAMES WATSON, Ball State University  
 ROBERT WILSON, San Bernardino Valley College  
 JOHN M. YELTON, University of Florida

El capítulo final sobre *fronteras* plantea desafíos singulares debido a que los temas están verdaderamente en las fronteras. En especial, queremos agradecer a Jeff Adams, Neil Cornish, William Hiscock (todos de la Montana State University), el fallecido Robert S. Pavini (Vanderbilt University), y Chris Waltham (University of British Columbia) por contribuir y actualizar los ensayos y ayudarnos a comprender estos temas.

También queremos agradecer a nuestro colega emérito Pierce Mullen por comprobar con atención la exactitud histórica del texto, por redactar todos excepto dos de los esbozos geográficos, y por aportar muchas ideas sobre la historia de la física.

La edición actual también aprovechó los esfuerzos de nuestro colega Jeff Adams, quien dedicó muchas horas a revisar las preguntas y los ejercicios conceptuales anteriores y a diseñar muchos innovadores y estimulantes. Gracias también a Natalia Dashkina (Millersville University), y Tracianne Neilsen (Brigham Young University), quienes concienzudamente revisaron la exactitud del material de todos los capítulos e interludios, y a Sytil Murphy por su muy cuidadoso trabajo en el índice analítico.

Por último, queremos agradecer al personal de Brooks/Cole Publishing por su profesionalismo, entusiasmo, y generoso apoyo: David Harris, editor; Michelle Juliet, editora en jefe; Chris Hall, editor de adquisiciones; Sam Subity, gerente de proyectos de tecnología; Mark Santee, gerente de mercadotecnia; Teri Hyde, gerente de proyectos de producción editorial. Agradecemos también a Leah McAleer y Jamie Armstrong en G&S Book Services, quienes coordinaron la producción. Este libro no tendría esta alta calidad sin la ayuda de quienes colaboraron estrechamente con nosotros; Peter McGahey por su diligente y cuidadoso trabajo como editor de desarrollo y por mantenernos dentro del calendario de trabajo, George Kelvin por sus estupendas ilustraciones, Dena Digilio-Betz por localizar excelentes fotografías, y Mary Ann Short por su cuidadoso desempeño en la edición del manuscrito.

Después de considerar con seriedad cada una de las sugerencias de los revisores, nosotros tomamos las decisiones finales y, por lo tanto, aceptamos la responsabilidad de cualquier error, omisión, y confusión que aún conserve el texto. Por supuesto, también apreciamos los comentarios que usted tenga. Envíe sus opiniones y sugerencias a Greg Francis, Physics, Montana State University, Bozeman, MT 59717-3840 o mediante correo electrónico a [francis@physics.montana.edu](mailto:francis@physics.montana.edu).

Larry D. Kirkpatrick  
Gregory E. Francis  
*Montana State University*  
*Enero de 2006*





# 1 Una visión del mundo



© Atlas image cortesía de 2MASS/IPAC-Caltech/NASA/NSF

*El cúmulo Coma contiene más de 1000 galaxias.*

Esta fotografía presenta un cúmulo de galaxias. Cada galaxia, un conjunto de miles de millones de estrellas, se ve pequeña porque está muy lejos de la Tierra. ¿A qué distancia está la galaxia más lejana que alguna vez se haya observado?

---

(Consulte la respuesta a esta pregunta en la página 12.)

---

La física en el estudio del mundo material. Es una búsqueda de esquemas, o reglas, del comportamiento de los objetos en el universo. Esta búsqueda cubre toda la diversidad de objetos materiales, desde las partículas más pequeñas que se conocen (millones de millones de veces más pequeñas que una canica) hasta objetos astronómicos (millones de millones de veces más grandes que nuestro Sol). La búsqueda también cubre toda la extensión del tiempo, desde la bola del fuego inicial hasta el destino definitivo del universo. Dentro de este vasto reino de espacio y tiempo, los exploradores tienen una meta: abarcar el curso de acontecimientos del mundo en su totalidad, para crear una visión del mundo.

## Ingreso a la escuela

Este curso puede ser una de las experiencias más desafiantes que alguna vez enfrente, excepto por la época que ingresó a la escuela. Pero en ese momento usted era demasiado joven para darse cuenta.

¿Qué sucedió cuando entró a la escuela?\* Aprendió a leer, y eso fue verdaderamente difícil. Primero tuvo que reconocer los nombres de todos esos extraños garabatos diminutos. Debió aprender a diferenciar una *b* de una *d* y una *p*. Aunque se asemejaban mucho, usted lo logró, e incluso le pareció divertido. Luego identificó los sonidos que representaba cada letra, y eso no fue fácil porque las mayúsculas parecían diferentes pero producían el mismo sonido y algunas letras tenían más de un sonido.

Un día, su maestra escribió algunas letras en el tablero: primero, con la letra *C*, todos se enteraron que podía sonar como kkk o como sss; luego una *A*, que por suerte era fácil y frecuente; después una *S*, que sonaba sss, pero se confundía con la *C*, y otra vez una *A*. Probó varios modos de pronunciarla, entre ellos *ce-a-ese-a*. Entonces alguien gritó triunfante: “¡Eso no es una ceaesea! Es un lugar con ventanas, puertas y cortinas.” Y su mundo nunca volvió a ser igual. Cuando su automóvil se detenía ante un semáforo en rojo, usted pronunciaba *Alto* y comprendía lo que los conductores debían hacer. Leía la palabra *chocolates* en un aparador y sabía que quería entrar a esa tienda.

Si este libro funciona, usted percibirá todo un mundo que nunca antes observó. Nunca caminará por una calle, conducirá un automóvil, o se mirará en un espejo sin captar involuntariamente una dimensión adicional. En ocasiones, tendrá que memorizar qué significan algunos símbolos, igual que cuando entró a la escuela. Otras veces confundirá cosas que tienen tantas semejanzas como la *b*, la *d* y la *p*, hasta que de repente entenderá sus diferencias. Y en otros momentos, presenciará impotente y con absoluta frustración una combinación de acontecimientos y ecuaciones, mientras recita *ce-a-ese-a*. Nos ha ocurrido a todos. Pero llegará el momento de la comprensión, y verá que las nuevas imágenes concuerdan entre sí. Verá la CASA y experimentará con plena conciencia el regocijo que sintió cuando ingresó a la escuela.

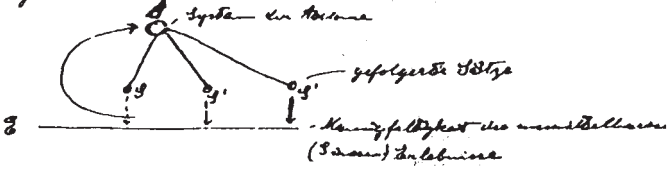
Bienvenido a uno de los cursos más desafiantes (y gratificantes) en que alguna vez participará. Si se sumerge en ella y permite que ocurra, esta experiencia cambiará su visión del mundo para siempre.

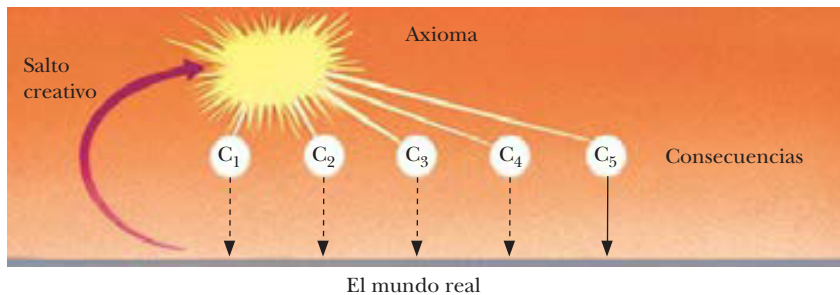
## Acerca de la creación de una visión del mundo

El término *visión del mundo* tiene un significado bastante flexible. Cuando hablamos de visiones del mundo, las interpretaciones van de lo filosófico a lo poético. En la física, la visión del mundo es un conjunto de ideas compartidas que representan las explicaciones actuales sobre cómo funciona el mundo material. Entre ellas están algunos conceptos bastante comunes, como la gravedad y la masa, al igual que algunos extraños, como los quarks y los agujeros negros.

La visión del mundo de la física es dinámica. Una y otra vez se proponen ideas, se debaten y se prueban contra el mundo material. Algunas resisten el escrutinio de

\*Adaptado de un artículo de Barbara Wolff, “An Introduction to Physics—Find the CAT”. *The Physics Teacher* 27 (1989): 427.

- (a) Mit der Erkenntnis - Theoretischen Sache haben Sie mich gewöhnliche  
menschlichen; menschlichen habe ich mich schlecht  
angedeutet. Ich sehe die Sache schmerzhaft so  
A, System der Axiome
- 
- (1) Die C (Erkenntnis) wird nur gegeben.
- (2) A ist die Axiome, aus denen viele Folgerungen gehen.  
Folgerungen beruhen auf A auf C. Es gibt aber keinen  
logischen Weg von der C zu A, sondern nur einen empirischen (physikalischen)  
Zusammenhang, der immer auf Widerstand ist.
- (3) Aus A werden auf logischen Weg Einzel - Aussagen (Folgerungen)  
welche Abstraktionen der Konsequenzen auf Richtigkeit abheben können
- (4) Die C werden mit der A in Beziehung gebracht (Brücke  
zu der Erfahrung). Diese Brücke gehört genau betrachtet  
ebenfalls der extra - logischen Sphäre an, weil die Beziehung  
da in der C auftretender Widerstand zu dem belohnenden C  
nicht logischer Natur sind.
- (b)



**Figura 1-1** (a) Reproducción de un diagrama de una carta de Albert Einstein. (b) Nuestra interpretación de este diagrama.

© Albert Einstein Archives, The Hebrew University of Jerusalem, Israel

la comunidad de físicos; otras, no. La inclusión de ideas nuevas a menudo obliga a rechazar nociones anteriores. Algunas ideas firmemente aceptadas en la visión del mundo son muy difíciles de desechar; sin embargo, a la larga, la experimentación supera las inclinaciones personales. El modelo del átomo como un sistema solar en miniatura fue abandonado a regañadientes porque los sucesos experimentales no lo apoyaban; fue reemplazado por un modelo matemático que es difícil de visualizar.

Algunos años antes de su muerte, Albert Einstein describió el proceso de la ciencia a un amigo de toda la vida, Maurice Solovine, quien no era un científico, pero parecía disfrutar las discusiones científicas con su famoso amigo. En uno de sus últimos intercambios, Solovine escribió que tenía problemas para comprender cierto pasaje de un ensayo de Einstein. La semana siguiente, Einstein contestó y explicó en detalle su visión del proceso científico. La figura 1-1(a) es una reproducción de esta carta. La figura 1-1(b) presenta nuestra interpretación del diagrama.

En su texto, Einstein explica el diagrama. La línea horizontal inferior representa el mundo real. La línea curva de la izquierda significa el salto creativo que ejecuta un científico cuando intenta explicar algunos fenómenos. El salto es intuitivo, y aunque puede resultar muy esclarecedor, no es científico. Einstein explica que el proceso científico comienza cuando el científico toma la idea, o axioma, y desarrolla consecuencias basadas en ella. Estas consecuencias se indican con varios círculos más pequeños conectados al axioma mediante líneas. Un axioma muy poderoso tiene una gran cantidad de consecuencias. La tarea final en el proceso de la ciencia es probar estas consecuencias contra el mundo material. En el dibujo de Einstein, estas pruebas son flechas verticales que regresan al mundo. Si no coinciden las consecuencias predichas y el mundo real, la idea no tiene valor científico.





© Helen Rogers/Photo Stock



© Science photo library/Photo Stock

El estudio de la física comenzó principalmente como un intento para comprender los movimientos de los planetas, las estrellas, y otros cuerpos alejados de la Tierra. Aquí se presentan: (a) el telescopio original de Galileo, que le permitió descubrir las cuatro lunas más grandes que orbitan Júpiter, y (b) un telescopio de reflexión moderno.

Si coinciden, existe la esperanza de que la idea tenga mérito. Con la publicación de la idea, la comunidad de científicos se incorpora al proceso, y a menudo se modifica el trabajo original.

Las ideas para las cuales existe un modelo físico sencillo son más fáciles de comprender y aceptar. Es cómodo representar los electrones y los protones como bolas diminutas, pero los científicos que anhelaban que el electrón fuera una bola de billar en miniatura nunca materializaron su deseo. El cosmólogo Sir Hermann Bondi, al comentar el estudio de la física en reinos más allá del rango de la experiencia humana directa, dijo, “deberíamos sorprendernos de que las moléculas de gas se comporten de manera muy parecida a las bolas de billar y no sorprendernos de que los electrones no lo hagan”. Esta sugerencia, aunque correcta, puede hacernos sentir como Alicia, en *A través del espejo*, quien escucha decir a la Reina Blanca que uno debe ser capaz de “creer en seis cosas imposibles antes del desayuno”.

Aunque algunas de las ideas en la física pueden parecer opuestas al sentido común, de hecho tienen sentido. Normalmente, las cosas que tienen sentido —que no violan su intuición o su sentido común— son las que se acoplan con su experiencia anterior. El sentido común es una visión personal del mundo. Igual que la visión del mundo de la física, su sentido común parte de una gran base experimental. La diferencia entre lo que tiene sentido para usted y lo que tiene sentido para un físico en parte se debe a los diferentes rangos de experiencia. En el punto donde nuestras observaciones están limitadas por un rango de sensaciones humanas, el físico tiene instrumentos que incorporan sensaciones más allá de lo humano. Nuestra estrella titilante es la ventana del físico hacia el universo.

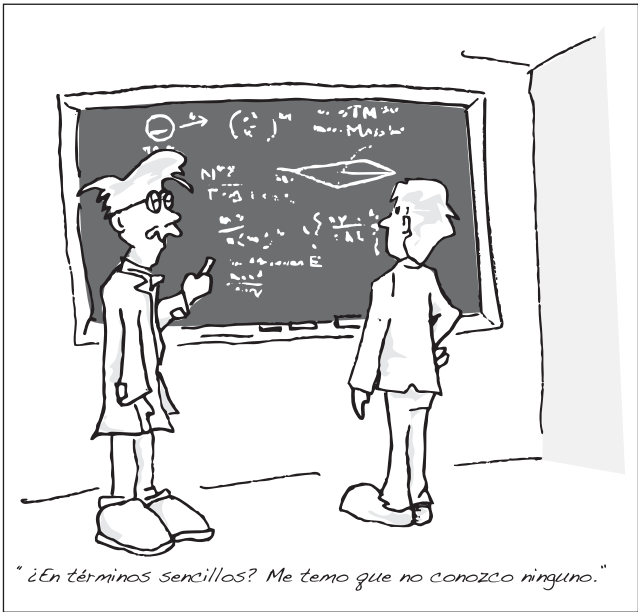
De modo que, si el sentido común no les indica si deben aceptar una idea nueva, ¿cómo deciden los físicos cuáles adoptar? La aceptación se basa en si funciona la idea, qué tan bien se acopla a su visión del mundo, y si es mejor que las explicaciones anteriores. Si bien los criterios más básicos para aceptar una idea son que coincida con los resultados de experimentos anteriores y prediga con éxito la consecuencia de experimentos futuros, la aceptación es una actividad humana. Debido a que es una actividad humana, tiene aspectos subjetivos. Las frases “qué tan bien se acopla” y “si es mejor” implican opiniones. Las ideas resultan atractivas, algunas más que otras.

Si una idea es muy general, y tiene muchas consecuencias en el sentido einsteineano, puede reemplazar muchas ideas separadas. Se considera más fundamental y, por lo tanto, más atractiva. Es posible desarrollar una explicación diferente para cada observación. Por ejemplo, se puede crear un esquema para explicar la desaparición del agua de un recipiente abierto, y es posible aplicar otra idea, no relacionada, para explicar la fluidez del agua, y así sucesivamente. Una idea acerca de la estructura de los líquidos (no sólo del agua) que sirva para explicar estos fenómenos y muchos otros sería un reemplazo muy apreciado para el conjunto de ideas separadas.

La sencillez de una idea también influye en las opiniones acerca de su valor. Si se proponen varios razonamientos para explicar los mismos fenómenos y todos predicen bien los resultados experimentales, la idea más atractiva es la más sencilla. Aunque los razonamientos complicados resultan atractivos en las caricaturas, su valor es limitado en la creación de una visión del mundo a partir de la física.

Por muy increíble que en un principio sea una idea, los físicos parecen sentirse cada vez más cómodos con ella conforme permanece más tiempo en su visión del mundo. Casi todos los físicos se sienten cómodos con las nociones relativistas del tiempo desacelerado y el espacio deformado; sin embargo, cuando se introdujeron estas ideas, provocaron una gran excitación. Conforme más resultados experimentales apoyan una idea, adquiere estatura y se vuelve una parte más establecida de nuestras nociones. Pero incluso si una idea se vuelve más familiar y cómoda, todavía es tentativa. Los resultados experimentales no pueden comprobar una idea; sólo pueden refutarla. Si las predicciones se confirman, lo mejor que puede afirmarse es “Hasta aquí, todo bien”.

Nuestra meta al redactar este libro es ayudarle a observar el mundo de un modo distinto. Describimos la creación de una visión del mundo de la física y compartimos con usted algunos de los resultados. Comenzamos en áreas que son



conocidas, en las cuales su sentido común funciona bien, y seguimos una ruta hacia áreas menos concurridas. Si bien este viaje no tiene fin, el libro debe detenerse. Confiamos que se detenga en un lugar nuevo, en el cual usted nunca haya estado. También esperamos que disfrute el proceso, tal como lo expresó Isaac Newton:

No sé qué le parezca al mundo, pero yo me considero un niño que juega en la playa, y se divierte de vez en cuando al hallar un guijarro más liso o una concha más bonita de lo común, mientras el gran océano de la verdad yace por descubrir ante mí.

Ley de Bode

En 1776, Titus of Wittenburg desarrolló una regla numérica que producía los tamaños relativos de las órbitas de los planetas. Bode popularizó esta regla y ahora se conoce como la ley de Bode. Pero, ¿es una ley de la física?

La regla se desarrolla por medio del proceso siguiente: el primer y el segundo números en la primera columna de la tabla 1-1 son 0 y 3. Todos los números subsecuentes son el doble del anterior. La segunda columna se obtiene al sumar 4 a los números de la primera columna. La tercera columna se resuelve al dividir entre 10 la información de la segunda columna. Estos son los números en la ley de Bode. Debido a que todos los radios de las órbitas se miden en relación con la Tierra, el

Tabla 1-1 | Ley de Bode

		Ley de Bode	Valor moderno	Planeta
0	4	0.4	0.39	Mercurio
3	7	0.7	0.72	Venus
6	10	1.0	1.00	Tierra
12	16	1.6	1.52	Marte
24	28	2.8		
48	52	5.2	5.20	Júpiter
96	100	10.0	9.54	Saturno
192	196	19.6		
384	388	38.8		

valor para Tierra (la “tercera roca a partir del Sol”) debe ser 1. El radio de la órbita de la Tierra, la distancia media entre la Tierra y el Sol, se conoce como unidad astronómica, o UA.

La regla señala que el radio de la órbita de Mercurio debe ser 0.4 veces el de la Tierra, o 0.4 unidad astronómica. Esto coincidía con el valor conocido en 1776 y se acerca al valor moderno de 0.39 unidad astronómica. Asimismo, el valor de 0.7 unidad astronómica para Venus coincide con el valor en el momento en que la ley fue desarrollada y se acerca al valor moderno de 0.72 unidad astronómica. Los valores modernos para Marte y Saturno difieren un poco de la regla, pero la regla coincidía con la información conocida en la época en que fue propuesta.

Una ley científica también debe ser comprobable; es decir, debe realizar predicciones que se puedan probar. Observe que, en 1776, no se conocían planetas que coincidieran con las filas quinta, octava o novena. Estas filas se puede considerar como predicciones para los radios orbitales de planetas que todavía no se descubrían. Urano, descubierto en 1781, tiene una órbita con un radio promedio de 19.2 unidades astronómicas, cercano al valor predicho. Hasta aquí, todo bien. El primero de los asteroides, conocido como Ceres, fue descubierto en 1801, y su órbita tiene un radio promedio de 2.8 unidades astronómicas, lo cual concuerda con la predicción. ¿Esto significa que la ley de Bode es una ley física de la naturaleza?

Neptuno, descubierto en 1846, tiene una órbita con un radio promedio de 30.1 unidades astronómicas; Plutón, descubierto en 1930, tiene una órbita con un radio promedio de 39.4 unidades astronómicas. Es evidente que la ley de Bode no funciona para los dos planetas más alejados. Debido a que fracasó para predecir estos radios, la ley de Bode debe descartarse.

No obstante, la ley de Bode nunca fue candidata para una ley física. Nunca tuvo bases científicas; fue sencillamente un modo de recordar los valores de los radios conocidos. En la actualidad, no se conoce alguna manera de predecir los radios de las órbitas de los planetas en los sistemas planetarios recién descubiertos en las estrellas cercanas. Además, se cree que cada sistema planetario es único.

Esto no quiere decir que las reglas numéricas como la ley de Bode no tengan una función en la ciencia. Como se observará muchas veces en el estudio de la física, el descubrimiento de esquemas en la naturaleza aporta los primeros pasos para desarrollar leyes físicas.

---

**Pregunta** ¿Cuáles son los tres criterios requeridos para que una idea se convierta en una ley física?

---

**Respuesta** (1) Debe explicar los datos conocidos. (2) Debe hacer predicciones que se puedan comprobar. (3) Debe tener una base científica.

---

✓ El suplemento *Problem Solving* (Solución de problemas) ofrece una presentación extendida.

## Medidas

✓ **MATEMÁTICAS**

Si alguien le ofreciera a la venta una barra de oro por \$200, de inmediato preguntaría “¿De qué tamaño es la barra?” Es obvio que el tamaño de la barra determina si es una buena compra. Existía un problema similar en los primeros días del comercio. Incluso cuando había unidades de medida comunes, no eran iguales de una época a otra ni de una región a otra. Más adelante, se desarrollaron varios sistemas de medidas estandarizados.

Los dos sistemas dominantes son el sistema que se acostumbra en EUA, basado en el pie, la libra y el segundo, y el sistema métrico, basado en el metro, el kilogramo y el segundo. Thomas Jefferson recomendó que Estados Unidos adoptara el sistema métrico, pero su consejo no fue aceptado. Como resultado, casi todas las personas en este país no utilizan el sistema métrico. Sin embargo, es utilizado por la comunidad científica y quienes trabajan en cosas como los automóviles. En la actualidad Inglaterra y Canadá han cambiado oficialmente al sistema métrico. Estados Unidos es el único país importante que no ha efectuado tal cambio.



Existen ventajas obvias al hacer que todo el mundo utilice un solo sistema. Evita la molesta tarea de convertir de un sistema a otro y ayuda al comercio mundial. Las desventajas para los países que deben cambiar son el gasto de convertir la maquinaria, las señales y los estándares; el mantenimiento de sistemas dobles durante un tiempo; y el reemplazo de las unidades conocidas con unidades nuevas que las personas no perciben de manera intuitiva.

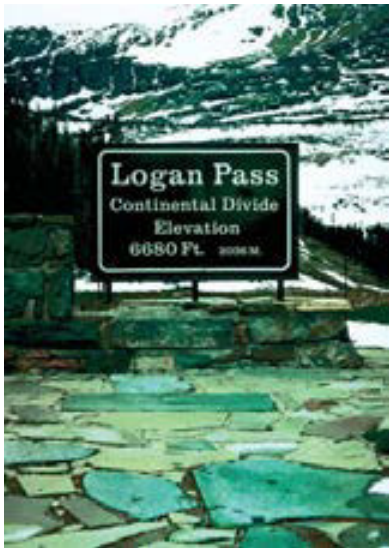
El sistema métrico tiene ventajas sobre el que se acostumbra en EUA y fue el sistema elegido en 1960 por la Conferencia General sobre Pesos y Medidas. La versión oficial se conoce como **Le Système International d'Unités** (Sistema Internacional de Unidades) o SI.

Un problema del sistema que se acostumbra en EUA se ejemplifica en la tabla 1-2, la cual contiene una lista de muestra de unidades que se utilizan para medir longitudes. Algunas de estas unidades son históricas; otras se desarrollaron para utilizarse en áreas especializadas. Muchas de ellas son poco conocidas. Pocos tienen idea de lo que mide una braza, sin hablar de cuántas pulgadas hay en una braza. Incluso entre las unidades más conocidas, la conversión de una a otra suele ser una tarea difícil. Por ejemplo, para determinar cuántas pulgadas hay en una milla, se debe efectuar el cálculo siguiente:

$$1 \text{ milla} = (5280 \text{ pies}) \left[ \frac{12 \text{ pulgadas}}{1 \text{ pie}} \right] = 63\,360 \text{ pulgadas}$$

El sistema métrico elimina la confusión de tener muchas unidades no conocidas diferentes y la dificultad de convertir de una unidad de tamaño a otra. Consigue esto al adoptar una sola unidad estándar para cada medida básica y una serie de prefijos que hacen la unidad más grande o más pequeña por factores de 10. Por ejemplo, la unidad básica para medir longitud es el **metro** (m), el cual es un poco más grande que una yarda. Esta unidad es inconvenientemente pequeña para medir las distancias entre las ciudades, de modo que las señales en los caminos de todo el mundo exhiben kilómetros (km) como la unidad de longitud. El prefijo **kilo** significa mil e indica que el kilómetro es igual a 1000 metros. El kilómetro es aproximadamente  $\frac{5}{8}$  millas, de modo que una distancia de 50 millas aparecerá como 80 kilómetros. Los límites de velocidad aparecen como 100 kilómetros por hora en lugar de 65 millas por hora.

Las distancias más pequeñas se miden en unidades como el centímetro (cm). El prefijo **centi** significa una centésima. Se necesitan 100 centímetros para igualar 1 metro. La tabla 1-3 contiene otros prefijos junto con sus abreviaturas y diversas formas de sus valores numéricos. Estas unidades se pronuncian con el acento en el prefijo. Observe también que los términos *billón* y *trillón* no tienen el mismo significado en todos los países. En este texto, 1 billón son mil millones y 1 trillón es 1 millón de millones.



© Larry D. Kirkpatrick

Algunas señales de carretera comunican la altura en pies y metros; en este caso, 6680 pies y 2036 metros.

◀ kilo = 1000

◀ centi =  $\frac{1}{100}$

**Tabla 1-2** | Lista parcial de medidas de longitud

angstrom	micrón
unidad astronómica	mil
grano de cebada	milla
codo	milla náutica
braza	paso
fermi	palmo
pie	parsec
furlong	cícero
mano	punto
pulgada	vara
legua	estadio
año luz	uña de pulgar
metro	yarda

Tabla 1-3 | Los prefijos métricos

Prefijo	Símbolo		Valor	
tera	T	billón	$10^{12}$	1 000 000 000 000
giga	G	mil millones	$10^9$	1 000 000 000
mega	M	millón	$10^6$	1 000 000
kilo	k	mil	$10^3$	1 000
		uno	$10^0$	1
centi	c	centésima	$10^{-2}$	0.01
mili	m	milésima	$10^{-3}$	0.001
micro	$\mu$	millonésima	$10^{-6}$	0.000 001
nano	n	milmillonésima	$10^{-9}$	0.000 000 001
pico	p	billonésima	$10^{-12}$	0.000 000 000 001
femto	f	milbillonésima	$10^{-15}$	0.000 000 000 000 001

Debido a que todos los prefijos son múltiplos de 10, las conversiones entre las unidades se realizan al mover el punto decimal; es decir, al multiplicar por y al dividir entre 10. Por ejemplo, debido a que **mili** significa una milésima, es posible convertir de milímetros (mm) a metros al multiplicar por 1000. Hay 5670 milímetros en 5.67 metros.

mili =  $\frac{1}{1000}$  ➔

**Pregunta** ¿Qué son  $10^9$  ante,  $10^6$  fono y  $10^{-6}$  oscopio?

**Respuesta** Un gigante, un megáfono y un microscopio.

En su forma más pura, el SI no permite otras unidades para la longitud. Sin embargo, otras unidades que se han desarrollado históricamente seguirán en uso durante algún tiempo (y tal vez para siempre). Por ejemplo, los términos *micrón* y *fermi* se siguen usando para micrómetro y femtómetro. Una unidad de longitud común en la escala astronómica es el año luz, la distancia que viaja la luz en 1 año. Aunque no es una unidad del SI, es una unidad de longitud que ocurre naturalmente en esta escala y se seguirá usando. Por otra parte, el angstrom ( $10^{-10}$  metros) ha sido muy popular, pero ha sido reemplazado por el nanómetro ( $10^{-9}$  metros).

El sistema métrico también difiere del sistema que se acostumbra en EUA en que la masa se considera la unidad primaria y el peso (la fuerza) la unidad secundaria. En el sistema que se utiliza en EUA, esta situación se invierte. (La diferenciación entre masa y peso se explica en el capítulo 3.) La unidad básica en el sistema que se emplea en EUA es la libra, pero la unidad básica en el SI es el **kilogramo** (kg). (Puede parecer extraño emplear el kilogramo en lugar del gramo [g] como la unidad básica, pero el gramo se considera demasiado pequeño para ser la unidad básica.) El peso de 1 kilogramo es 2.2 libras. Una moneda estadounidense de 5 centavos tiene una masa muy cercana a los 5 gramos. El término *megagramo* (1000 kilogramos) no se aplica a menudo en el sistema métrico. Se conoce como una tonelada métrica y tiene un peso igual a una tonelada larga (2200 libras).

Desde la invención del sistema métrico en 1791, se han hecho muchos intentos infructuosos para cambiar el sistema de tiempo a una base decimal, para que las unidades de tiempo también sean múltiplos de 10. Todos han fracasado. El SI tiene las mismas unidades de tiempo que el sistema que se acostumbra en EUA.

Debido a que el sistema métrico es el sistema principal utilizado en la ciencia, es muy recomendable familiarizarse con él. Por otra parte, nuestro propósito principal es establecer conexiones entre la visión del mundo de su sentido común y la visión del mundo de la física. Es complicado aprender el sistema métrico al mismo tiempo que iniciar su estudio de la física, porque necesita familiarizarse con las unidades nuevas, al igual que con las ideas científicas. Como una solución intermedia, aquí se utiliza predominantemente el sistema métrico, pero cuando resulta útil se presentan entre paréntesis los equivalentes ingleses aproximados.

## Tamaños: Grande y pequeño

Imagine que toma una fotografía de tres niños acostados en una frazada en su patio.\* Suponga que la cámara está directamente encima de los niños y que la escena capturada en la película tiene 1 metro de ancho por 1 metro de altura. Un metro, poco más de 3 pies, es la escala de los niños. De hecho, también es la escala de los adultos porque cuando se habla de tamaños aproximados de los objetos no importan factores de 2, 3, o incluso 5.

Si ahora alejamos la cámara 10 veces la distancia a la que están los niños, la película capturará una escena de 10 metros de ancho y 10 metros de altura. La nueva escena tiene un área 100 veces más grande y puede incluir aproximadamente 300 niños. Si se mueve de nuevo la cámara 10 veces la distancia actual, la escena tendrá 100 metros por lado, más o menos la longitud de un campo de fútbol. A otras 10 veces la distancia, nuestra escena tendría 1000 metros, o 1 kilómetro (0.62 millas) por lado y cabría todo el vecindario de los niños.

Si se sigue aumentando la distancia desde los niños por factores adicionales de 10, las escenas capturadas por la cámara se harían cada vez más grandes. De hecho, serían tan grandes que sería difícil determinar el número de ceros en la altura y el ancho de la fotografía. Por lo tanto, se utilizan las **potencias de notación diez**, las cuales exhiben la cantidad de ceros en estos números. En matemáticas, la notación  $10^2$  significa  $10 \times 10$ , lo cual es igual a 100. Asimismo,  $10^3$  significa  $10 \times 10 \times 10 = 1000$ . El superíndice se llama *exponente* y es igual al número de dieces que se multiplican juntos. El exponente también es igual a la cantidad de ceros en estos números. (Observe que  $10^0 = 1$ .)

Los valores positivos para los exponentes indican que los números son grandes. Los exponentes negativos indican números pequeños. Por ejemplo,  $10^{-1} = \frac{1}{10^1} = 0.1$  y  $10^{-2} = \frac{1}{10} \times \frac{1}{10} = \frac{1}{10^2} = 0.01$ . El signo menos indica que la potencia de 10 está en el denominador; es decir, va a dividir a 1. El **orden de magnitud** para una cantidad es su valor redondeado a la potencia de diez más cercana.

En una escala de  $10^6$  metros (620 millas), nuestra escena abarcaría algunos estados grandes, como se aprecia en la fotografía de LandSat de la figura 1-2. A  $10^7$  metros, entraría en escena casi toda la Tierra, igual que en la figura 1-3. La órbita de la Luna aparecería en una escala de  $10^9$  metros, y en una escala de  $10^{13}$  metros se incluiría todo el Sistema Solar. Si continúa el alejamiento, las fotografías se asemejarían mucho, un campo de estrellas de brillantez variable. En una escala de  $10^{21}$



**Figura 1-2** Esta fotografía del sureste de Estados Unidos presenta una escena que mide  $10^6$  metros por lado.

© Jacques Descloitres, MODIS Land Rapid Response Team, NASA/GSFC

\* Basada en Philip Morrison, Phylis Morrison, y la oficina de Charles y Ray Eames, *Powers of Ten* (Redding, Conn.: Scientific American Books, 1982).



© NASA

**Figura 1-3** A una escala de  $10^7$  metros, la Tierra alcanza los bordes de la fotografía.

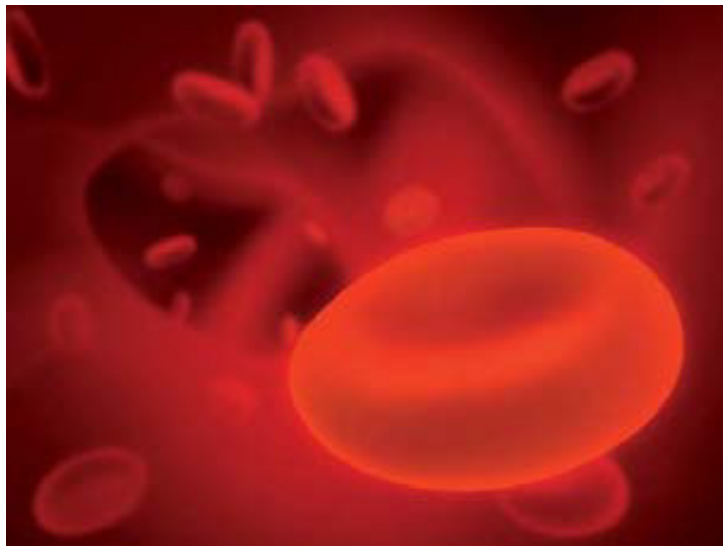


© NASA

**Figura 1-4** La galaxia Vía Láctea tiene una escala de  $10^{21}$  metros.

metros, nuestra escena presenta la galaxia Vía Láctea (figura 1-4), un conjunto de miles de millones de estrellas. Al continuar el proceso, se observa que disminuye el tamaño de la Vía Láctea y entran en la imagen muchas otras galaxias. A una distancia todavía mayor, las galaxias se ven como estrellas. (Consulte la fotografía del inicio del capítulo.) En una escala de  $10^{26}$  metros, nos acercamos al borde del universo que se alcanza al ver desde la Tierra.

Ahora regresemos a nuestros niños e imaginemos imágenes a escalas cada vez más pequeñas, al disminuir el tamaño de nuestra fotografía por un factor de 10. Con una fotografía de  $\frac{1}{10}$  metros por lado (una escala de  $10^{-1}$  metros), nuestra fotografía incluiría la mano de un niño. En una escala de  $10^{-2}$  metros = 1 centímetro (un poco menos que  $\frac{1}{2}$  pulgada), sólo podríamos ver la uña de un niño. El grosor de la uña de un dedo es aproximadamente  $10^{-3}$  metros = 1 milímetro. Los glóbulos rojos miden aproximadamente  $10^{-5}$  metros de un lado a otro. Los capilares sanguíneos son apenas un poco más grandes que los glóbulos rojos. Las células vivas más pequeñas son 100 veces más pequeñas en una escala de  $10^{-7}$  metros. Los átomos



© Lukyanova Natalia/Shutterstock



que forman las moléculas de estas células tienen diámetros en el orden de  $10^{-10}$  metros. En una escala aproximadamente 10 000 veces más pequeña, encontramos los núcleos de estos átomos; en una escala de  $10^{-15}$  metros están los protones y los neutrones que forman los núcleos de los átomos. Incluso estos protones y neutrones están formados por quarks.

El tamaño del universo visible es un increíble  $10^{41}$  veces el tamaño de los protones y neutrones. Los físicos estudian el mundo material en ambos extremos de la escala de tamaños y en todos los niveles intermedios.



## SOLUCIÓN | Potencias de diez

En este libro estudiamos objetos y acontecimientos que van mucho más allá de la escala humana normal de objetos y acontecimientos. Incluso cuando analizamos fenómenos en escalas muy grande y muy pequeña, los tamaños de los números rápidamente se salen de control. Por ejemplo, los radios aproximados del universo visible y de un protón son

radio del universo visible = 140 000 000 000 000 000 000 000 m

radio del protón = 0.000 000 000 000 001 2 m

Es difícil leer, escribir y manipular matemáticamente estos números. E incluso es fácil equivocarse al contar los ceros, a menos que se formen grupos de tres, como se hizo aquí.

Al utilizar la notación de potencias de diez, el radio del universo visible se escribe como  $1.4 \times 10^{26}$  m. Esto indica que el número principal se va a multiplicar por diez 26 veces para obtener el número real. Debido a que una multiplicación por diez sencillamente mueve el punto decimal una posición a la derecha, el superíndice 26 indica la cantidad total de lugares que debe moverse el punto decimal. Por convención, el número principal se suele escribir de modo que tenga un valor entre 1 y 10. Usted debe comprobar que mover el punto decimal 26 lugares a la derecha en el número 1.4 produce el valor presentado párrafos arriba.

El radio del protón se escribe como  $1.2 \times 10^{-15}$  m. El número principal debe dividirse entre diez 15 veces. O lo que es lo mismo, el número se obtiene al trasladar el punto decimal 15 posiciones a la izquierda.

En ocasiones puede ver un número escrito con sólo la potencia de 10. Si falta el número que antecede a una potencia de 10, se supone que es 1; es decir,  $10^5 = 1 \times 10^5$ . Asimismo, si falta el exponente, se supone que es cero; es decir,  $4 = 4 \times 10^0$ .

La principal ventaja de utilizar esta notación surge cuando tiene que multiplicar o dividir números muy grandes o muy pequeños. Para la *multiplicación*, multiplique los dos números principales y sume los exponentes. Por ejemplo,

$$\begin{aligned} R_{\text{universo}} \times R_{\text{protón}} &= (1.4 \times 10^{26} \text{ m}) \times (1.2 \times 10^{-15} \text{ m}) \\ &= (1.4 \times 1.2) \times 10^{26+(-15)} \text{ m} \times \text{m} \\ &= 1.7 \times 10^{11} \text{ m}^2 \end{aligned}$$

Este número representa un área que tiene el ancho de un protón y una longitud que va desde la Tierra hasta el borde del universo visible.

Para la *división*, usted divide los dos números principales y *resta* el exponente del denominador del que está en el numerador. Por ejemplo,

$$\begin{aligned} \frac{R_{\text{universo}}}{R_{\text{protón}}} &= \frac{1.4 \times 10^{26} \text{ m}}{1.2 \times 10^{-15} \text{ m}} = \frac{1.4}{1.2} \times 10^{26-(-15)} \frac{\text{m}}{\text{m}} \\ &= 1.2 \times 10^{41} \end{aligned}$$

Este número produce el tamaño relativo del universo visible y el protón; es decir, cuántas veces es más grande el universo visible que un protón.

## Resumen

Este curso puede ser una de las experiencias más desafiantes que haya enfrentado desde que ingresó a la escuela. Al mismo tiempo, puede ser una experiencia muy gratificante que puede modificar su visión del mundo que lo rodea.

La visión del mundo de la física es un conjunto de ideas compartidas que representan las explicaciones actuales de cómo funciona el mundo material. Es una visión dinámica en la cual se proponen, debaten y prueban ideas nuevas. Para que una idea nueva sea aceptada, debe: (1) coincidir con la información existente, (2) hacer predicciones que se puedan probar y (3) tener una base científica.

El sistema de medidas utilizado en la ciencia (y en casi todo el mundo) es el sistema métrico, o SI, el cual se basa en el metro, el kilogramo y el segundo. Se obtienen unidades más grandes y más pequeñas mediante el uso de prefijos.

Los tamaños de los objetos estudiados en la física van del universo completo (en una escala de  $10^{26}$  metros) hasta los neutrones y protones (en una escala de  $10^{-15}$  metros).

## Capítulo 1



## Revisión

Las galaxias más alejadas que podemos observar están cerca del borde del universo, a una distancia de aproximadamente  $10^{26}$  metros de la Tierra.

## TÉRMINOS IMPORTANTES

**centi:** Un prefijo que significa  $\frac{1}{100}$ . Un centímetro es  $\frac{1}{100}$  metros.

**kilo:** Un prefijo que significa 1000. Un kilómetro son 1000 metros.

**kilogramo:** La unidad de masa del SI. Un kilogramo de material pesa aproximadamente 2.2 libras en la Tierra.

**metro:** La unidad de longitud en el sistema internacional, igual a 39.37 pulgadas o 1.094 yardas.

**mili:** Un prefijo que significa  $\frac{1}{1000}$ . Un milímetro es  $\frac{1}{1000}$  metro.

**notación de potencias de diez:** Un método para escribir números en el cual un número entre 1 y 10 se multiplica por 10 elevado a una potencia.

**orden de magnitud:** El valor de una cantidad redondeado a la potencia de diez más cercana.

**Système International d'Unités:** El nombre en francés del sistema métrico, o Sistema Internacional (SI) de unidades.

## PREGUNTAS CONCEPTUALES

Casi todas las preguntas y ejercicios están pareados, de modo que después de casi todas las preguntas y ejercicios con números impares hay otro similar con un número par. Al final de este libro se presentan respuestas breves para casi todas las preguntas y ejercicios con números impares. Las preguntas más desafiantes se señalan mediante un ▲.

- Compare y diferencie la visión del mundo de la física con su propia visión del mundo.
- ¿Qué es una visión del mundo de la física?
- ¿Por qué la ley de Bode, que proporciona los tamaños de las órbitas de los planetas, no se considera una ley física?
- ¿Por qué debe sospechar de un libro llamado *La teoría de todo*?
- ¿Cuáles son los criterios para aceptar una teoría como una ley física?
- ¿Cuáles criterios para una ley física no satisfacen la ley de Bode, la cual proporciona los tamaños de las órbitas de los planetas?
- ¿Qué función desempeña el prestigio de un científico al aceptar una teoría como una ley física?
- ¿Sería más probable que se aceptara una teoría científica propuesta por un profesor de una universidad destacada o una desarrollada por un hombre común de la calle?
- ¿Cuáles países importantes (de haberlos) no han adoptado el sistema métrico como el sistema de medidas principal?
- ¿Cuáles son las ventajas y desventajas de adoptar el sistema métrico?
- ¿Cuál es la estatura de una persona común, en centímetros?
- ¿Cuál es la estatura de un recién nacido normal, en centímetros?
- ¿Cuál es la altura normal del techo de una habitación, en metros?
- ¿Cuánto mide una cama de tamaño completo, en metros?
- ¿Cuál es la masa normal de un hombre que mide 1.8 metros, en kilogramos?
- ¿Cuál es la masa normal de una mujer que mide 1.65 metros, en kilogramos?
- ¿Qué es un  $10^{-2}$  nosaurio?
- ¿Qué es un  $10^{12}$  osito?
- ¿Cuál es el orden de magnitud para la población del mundo?
- ¿Cuál es el orden de magnitud para la distancia de un extremo a otro de Estados Unidos?

**EJERCICIOS**

1. ¿Cuántos segundos hay en 1 día?
2. ¿Cuántos segundos hay en 1 año?
3. ¿Cuánto es una carrera de 100 metros en yardas si  $1\text{ m} = 1.094\text{ yd}$ ?
4. Si  $1\text{ pulgada} = 2.54\text{ cm}$ , ¿cuál es la estatura (en centímetros) de un jugador de baloncesto que mide 6 pies?
5. ¿Cuántas pulgadas hay en 1 m?
6. ¿Cuántas pulgadas hay en 1 km?
7. Escriba cada uno de los números siguientes en notación de potencias de 10:
  - a. 68 200 m
  - b. 0.000 000 000 456 g
8. Escriba cada uno de los números siguientes en notación de potencias de 10:
  - a. 8 448 000 000 pulgadas
  - b. 0.001 48 mm
9. Escriba cada uno de los números siguientes como números comunes:
  - a.  $3.48 \times 10^3\text{ s}$
  - b.  $1.11 \times 10^{-5}\text{ kg}$
10. Escriba cada uno de los números siguientes como números comunes:
  - a.  $4.72 \times 10^5\text{ pies}$
  - b.  $2.73 \times 10^{-3}\text{ s}$
11. Concluya los cálculos siguientes:
  - a.  $(2.7 \times 10^{-3}) \times (2.3 \times 10^4)$
  - b.  $\frac{9.6 \times 10^6}{3.0 \times 10^{-3}}$
12. Concluya los cálculos siguientes:
  - a.  $(4.2 \times 10^7) \times (5.2 \times 10^4)$
  - b.  $\frac{4.4 \times 10^5}{5.4 \times 10^2}$
13. ¿Aproximadamente cuánto más grande es la órbita de Plutón que la órbita de la Luna?
14. ¿Aproximadamente cuánto más grande es la uña de un niño que uno de los protones de la uña?



## 2 Descripción del movimiento



© Even Kainbarack/Shutterstock

La imagen borrosa del tren indica claramente que está en movimiento. Para aparecer borroso en la fotografía, el tren tuvo que estar en diferentes lugares durante el tiempo que estuvo abierto el obturador. Si se conoce la rapidez a la que avanza el tren, ¿es posible determinar cuánto tiempo tardará en llegar a su destino?

---

(Consulte la respuesta a esta pregunta en la página 28.)

---

Una propiedad común para todo en el universo es el cambio. Algunas cosas son grandes, otras son pequeñas; algunas son rojas, otras no tienen color en absoluto; algunas son rígidas, otras son fluidas; pero todas cambian. De hecho, el cambio es tan importante que el concepto fundamental del tiempo no tendría sentido sin él.

El cambio ocurre incluso cuando parece que no hay ninguno. El agua que se evapora, los colores que desaparecen, las flores que crecen y las estrellas que evolucionan, son todos ejemplos de cambios que están más allá de nuestras observaciones casuales. También más allá de nuestras sensaciones está el hecho de que estos cambios son el resultado del movimiento de la materia, a menudo a un nivel submicroscópico. Debido a que el cambio —y, por lo tanto, el movimiento— está tan generalizado, comenzamos nuestra exploración de las ideas de la física con un estudio del movimiento.

Dentro de nuestra visión del mundo mediante el sentido común, generalmente consideramos juntos todos los movimientos, con sólo observar que un objeto se mueve o no. En realidad, existe una extraordinaria diversidad de movimientos, que van desde el muy sencillo hasta el extremadamente complicado. Por suerte, los movimientos complejos —algunos más comunes en nuestras experiencias cotidianas— se comprenden como combinaciones de movimiento más sencillos. Por ejemplo, el movimiento de la Tierra es una combinación de una rotación diaria sobre su eje y una revolución anual alrededor del Sol. O, algo más cercano, el movimiento de un balón de fútbol americano se puede considerar una combinación de un ascenso y descenso vertical, un desplazamiento horizontal, y el giro sobre un eje.

Por lo tanto, comenzamos nuestro análisis del movimiento al tratar de describir y comprender los tipos de movimiento más sencillos. Esto producirá una estructura conceptual dentro de nuestra visión del mundo, desde la cual se pueden comprender incluso los movimientos más complicados, como los que se asocian con un huracán o una cascada turbulenta.

## Rapidez promedio

Imagine que conduce hacia su casa desde la escuela. Por sencillez, suponga que puede hacerlo en una línea recta. Normalmente, describiría este viaje en términos del tiempo que requiere. Si le pidieran más detalles, es probable que diera la distancia o la ruta que tomó, y que mencionara algunos puntos de interés por los que haya pasado. Para nuestros propósitos, necesitamos desarrollar una descripción más precisa del movimiento.

Primero, observamos que su posición cambia continuamente mientras conduce. Segundo, consideramos que requiere cierto tiempo para hacer el viaje. Estas dos nociones fundamentales —espacio y tiempo— son el centro de nuestro concepto de movimiento. Además, es posible relacionar diferentes posiciones a lo largo del viaje con tiempos distintos.

Una relación entre el espacio y el tiempo se ejemplifica al responder la pregunta “¿Cuál es la rapidez a la que avanza?”. En realidad, hay dos maneras de responder esta pregunta. Una contempla el viaje total, mientras la otra considera los detalles momento a momento del viaje. Para la descripción del viaje total, empleamos el concepto de **rapidez promedio**, definida como la distancia total recorrida dividida entre el tiempo requerido para cubrir esta distancia.

Podemos anotar esta relación de manera más eficiente al utilizar símbolos como abreviaturas:

$$\bar{s} = \frac{d}{t}$$

en donde  $\bar{s}$  es la rapidez promedio,  $d$  es la distancia recorrida y  $t$  es el tiempo requerido para el viaje. Se suele aplicar una barra sobre un símbolo para indicar su valor promedio.

Esta razón de la distancia entre el tiempo genera la rapidez promedio a la que cambia la posición del automóvil. La rapidez es una medida cuantitativa de cuán rápido ocurre el cambio. La definición de rapidez promedio establece una relación



© Royalty-Free/Corbis

El movimiento de un balón de fútbol americano es una combinación de tres movimientos más sencillos.



© Andy Magee/Shutterstock

El arroyo Havasu en el río Colorado en el parque nacional Grand Canyon.

$$\text{rapidez promedio} = \frac{\text{distancia recorrida}}{\text{tiempo requerido}}$$



Las señales de una carretera y su reloj sirven para calcular su rapidez promedio.

particular entre los conceptos de espacio y tiempo. Si se conocen dos de las tres cantidades, se determina la tercera.

Una historia graciosa acerca de un rústico granjero ejemplifica esta relación. El granjero recibió la visita de un primo influyente. Ansioso de causar una buena impresión, el anfitrión dedicó la mañana a mostrar al primo su pequeña granja. A la hora de la comida, el primo no resistió el impulso de jactarse de que en su hacienda podía subirse a su automóvil temprano en la mañana, conducir hasta el atardecer y todavía estar en su propiedad. El granjero pensó por un momento y luego replicó: “Una vez tuve un auto igual de lento.”

Para medir la rapidez, necesitamos un dispositivo para medir la distancia, como una regla, y uno para medir el tiempo, como un reloj. Casi todas las carreteras tienen señales a un lado del camino para que el personal de mantenimiento y los oficiales de carreteras ubiquen con precisión ciertos lugares. Estas señales y su reloj le proporcionan toda la información que necesita para determinar la rapidez promedio.

Suponiendo que primero “pensamos en los metros”, la rapidez tiene unidades como metros por segundo (m/s) o kilómetros por hora (km/h). Una persona recorrer aproximadamente  $1\frac{1}{2}$  metros por segundo, y un vehículo que viaja a 70 millas por hora recorre cerca de 113 kilómetros por hora.

### FÍSICA | HÁGALO USTED MISMO

Calcule la rapidez promedio de un objeto cotidiano, como una hoja que cae, un copo de nieve que cae, o una onda que recorre un extremo de su bañera a otro.

✓ El suplemento *Problem Solving* (Solución de problemas) ofrece una presentación extendida.

## Imágenes de la rapidez

✓ **MATEMÁTICAS**

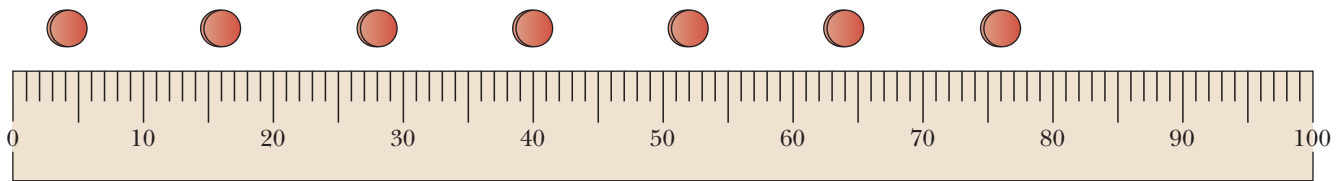
Desde los primeros dibujos en cavernas hasta la fotografía a intervalos de tiempo, tratar de representar nuestras experiencias ha sido parte de la naturaleza humana. Los artistas, al igual que los científicos, han imaginado muchas maneras de ejemplificar el movimiento. Una pintura o una fotografía borrosa, como la de la figura 2-1, es un modo de “observar” el movimiento. Una diferencia entre el artista y el científico es que este último emplea las representaciones para analizar el movimiento.

Una imagen inteligente del movimiento que también ofrece un modo de medir la rapidez de un objeto es la fotografía con varias exposiciones. Estas fotografías se hacen en una habitación totalmente oscura con un estroboscopio (también llamado “estrobo”) y una cámara con un obturador abierto. Un estrobo es una fuente de luz que destella a una rapidez constante y controlable. La duración de cada destello es muy breve (alrededor de 10 millonésimas de segundo), y produce una imagen fija del objeto en movimiento.

Si el estrobo destella 10 veces por segundo, la fotografía resultante mostrará la posición del objeto a intervalos de tiempo de  $\frac{1}{10}$  segundo. Por lo tanto, podemos “congelar” el movimiento del objeto en una secuencia de acontecimientos individuales y utilizar esta representación para medir su rapidez promedio dentro de cada intervalo de tiempo.

**Figura 2-1** El borrón del fondo nos indica que el automóvil de carreras está en movimiento.





**Figura 2-2** Una fotografía de estrobo de un disco que se mueve muestra la posición en tiempos diferentes.

Como ejemplo de la medición de la rapidez promedio, determinemos la rapidez promedio del disco de la figura 2-2. El disco viaja de una posición cercana a la marca de 4 centímetros a una cercana a la marca de 76 centímetros, una distancia total de 72 centímetros. Debido a que hay siete imágenes, existen seis intervalos y el tiempo total tomado es seis veces el tiempo entre los destellos; es decir, 0.6 segundos. Por lo tanto, la rapidez promedio es

$$\bar{s} = \frac{d}{t} = \frac{72 \text{ cm}}{0.6 \text{ s}} = 120 \text{ cm/s}$$

También podemos determinar la rapidez promedio del disco entre cada par de destellos adyacentes. Aunque se permiten incertidumbres al leer los valores de las posiciones del disco, la rapidez promedio para cada intervalo de tiempo es igual que el promedio general. Por lo tanto, el disco viaja a una rapidez constante de 120 centímetros por segundo.

Suponga que usted vive a 40 millas de la escuela y tarda 2 horas en conducir a su casa. Su rapidez promedio durante el viaje es

$$\bar{s} = \frac{d}{t} = \frac{40 \text{ millas}}{2 \text{ h}} = 20 \frac{\text{millas}}{\text{h}}$$

Esto significa que, en promedio, viaja una distancia de 20 millas durante cada hora de viaje. La respuesta se lee “20 millas por hora” y se suele escribir como 20 millas/hora o, abreviada, 20 mph. Es importante que su respuesta incluya las unidades. Una rapidez de “20” no tiene ningún sentido. Pueden ser 20 millas por hora o 20 pulgadas por año, datos de rapidez promedio muy diferentes.

En realidad, es probable que no avance a 20 mph durante gran parte de su viaje. En ocasiones se detiene ante los semáforos; otras veces llega a viajar a 50 mph. El uso de una rapidez promedio no toma en cuenta los detalles del viaje. A pesar de esto, el concepto de rapidez promedio es una noción útil.

**Pregunta** ¿Cuál es la rapidez promedio de un avión que vuela 3000 millas en 6 horas?

**Respuesta** Si aplicamos la definición de rapidez promedio, tenemos

$$\bar{s} = \frac{d}{t} = \frac{3000 \text{ millas}}{6 \text{ h}} = 500 \text{ mph}$$

Límite de rapidez

50 km/h\*

\* Para convertir millas a kilómetros, multiplique el número de millas por 1.60934.





**SOLUCIÓN** | Potencias de diez

Si usted conoce la rapidez promedio, puede determinar otra información acerca del movimiento. Por ejemplo, puede obtener el tiempo requerido para un viaje. Suponga que planea conducir una distancia de 60 millas con el control de avance automático establecido en 50 mph. ¿Cuánto tiempo requiere su viaje?

Sin hacer un cálculo de manera consciente, es probable que sepa que la respuesta es poco más de 1 h. ¿Cómo obtiene una respuesta más precisa? Divide la distancia recorrida entre la rapidez promedio. Para nuestro ejemplo, obtenemos

$$t = \frac{d}{\bar{s}} = \frac{60 \text{ millas}}{50 \text{ millas/h}} = 1.2 \text{ h}$$

También puede calcular cuánta distancia recorrerá con una rapidez promedio especificada durante un tiempo determinado. Por ejemplo, suponga que planea mantener una rapidez promedio de 50 mph en un viaje futuro. ¿Cuánto viajará si conduce 8 h diarias?

$$d = \bar{s}t = \left(50 \frac{\text{millas}}{\text{h}}\right)(8 \text{ h}) = 400 \text{ millas}$$

Por lo tanto, espera conducir 400 millas cada día.

$$\text{tiempo requerido} = \frac{\text{distancia recorrida}}{\text{rapidez promedio}} \rightarrow$$

$$\text{distancia recorrida} = \text{rapidez promedio} \times \text{tiempo requerido} \rightarrow$$



**Figura 2-3** Un velocímetro le indica la rapidez instantánea de un automóvil.



¿La bala tiene una rapidez en el instante en que se tomó esta fotografía?

La rapidez instantánea es la rapidez promedio en un intervalo muy pequeño. ➔

**Rapidez instantánea**

La noción de rapidez promedio es limitada en casi todos los casos. Incluso algo tan sencillo como su viaje a casa desde la escuela es un movimiento mucho más rico de lo que indica nuestro concepto de rapidez promedio. Por ejemplo, no reconoce las partes de su viaje cuando se detiene en espera que cambie la luz de un semáforo ni las partes en que excede el límite de velocidad. No se puede responder una pregunta sencilla, como “¿cuál era su rapidez al pasar por las calles Tercera y Vid?”, con sólo conocer la rapidez promedio.

Para responder la pregunta, “¿cuál era su rapidez al pasar por un punto específico o en un momento específico?”, necesitamos considerar un concepto nuevo, conocido como rapidez instantánea. Esta descripción del movimiento más completa nos indica con cuánta rapidez viajaba en cualquier instante durante su viaje. Debido a que esta es la función del velocímetro de su automóvil (figura 2-3), la idea no es novedosa para usted, aunque su definición precisa puede serlo.

En realidad, las definiciones de rapidez promedio y rapidez instantánea son muy similares. La única diferencia es el intervalo de tiempo que incorporan. Si queremos saber a qué rapidez iba en un instante específico, debemos estudiar el movimiento durante un intervalo muy pequeño. La **rapidez instantánea** es igual a la rapidez promedio durante un intervalo que es muy, muy pequeño.

Como una primera aproximación a la medición de la rapidez instantánea, podemos medir qué tan lejos viajó un automóvil durante  $\frac{1}{10}$  segundo y calcular la rapidez promedio para este intervalo de tiempo. Con un equipo preciso es posible determinar la rapidez promedio durante intervalos de tiempo de  $\frac{1}{100}$  segundo,  $\frac{1}{1000}$  segundo, o incluso más pequeños. ¿Qué tan pequeño necesitamos que sea el intervalo? Para propósitos prácticos, necesitamos un intervalo lo bastante pequeño para que la rapidez promedio no cambie mucho si aplicamos un intervalo todavía más pequeño. En el análisis de casi todos los movimientos reales, la rapidez instantánea, más que la rapidez promedio, es la que desempeña una función importante.

## El más rápido y el más lento



Corredoras en los Juegos Olímpicos de Atenas 2004.

En el universo, lo más rápido es la velocidad de la luz, 300 millones de metros cada segundo (186 000 millas por segundo) y, por supuesto, la rapidez más lenta es cero. Entre esos dos extremos, la rapidez cubre un enorme rango. Con excepción de muy pocas partículas subatómicas muy pequeñas que han sido catapultadas a través de inmensos voltajes eléctricos o liberadas en reacciones nucleares, casi todas las cosas se mueven en valores de rapidez cercanos al extremo lento del rango.

Los objetos grandes más rápidos son los planetas, que avanzan con una rapidez hasta de 107 000 mph. Nuestra propia Tierra orbita el Sol a 67 000 mph. (Incluso esta ciertamente alta rapidez es 10 000 veces más lenta que la rapidez de la luz.) Más cerca de casa, pero todavía en el espacio, la nave espacial *Apolo* regresó a la Tierra viajando a una rapidez de 24 800 mph, y los transbordadores espaciales orbitan la Tierra a 17 500 mph.

Las máquinas que transportan personas tienen un amplio rango de rapidez, desde los aviones supersónicos con una rapidez récord de 2193 mph (el Blackbird SR-71A de Lockheed) hasta las escaleras móviles con una rapidez de desplazamiento de 4 mph. Entre ellas tenemos la rapidez récord establecida por trineos propulsados por cohetes sobre rieles a 6453 mph, los aviones de pasajeros (el Concorde) a 1450 mph, los automóviles de propulsión a chorro a 763 mph, los automóviles de carreras a 410 mph, los trenes que levitan de manera magnética a 343 mph, motocicletas a 191 mph, y bicicletas a 167 mph (mientras derivan tras un vehículo).

Cuando descartamos nuestras máquinas, nos volvemos mucho más lentos. La rapidez humana más alta registrada es la carrera de 100 metros de Asafa Powell en 9.77, o aproximadamente 22.9 mph. El tiempo más rápido registrado en 100 metros por una corredora es 10.49 segundos (21.3 mph) por Florence Griffith Joyner. (En el tiempo que tarda cualquiera de estos corredores en su carrera, ¡un rayo de luz podría ir a la Luna, reflejarse en un espejo, y regresar con 7 segundos de sobra!) Conforme la distancia se hace más grande, la rapidez disminuye: el poseedor del récord de 1 milla es Hicham El Guerrouj, con un tiempo de 3 minutos y 43.13 segundos, que corresponde a poco más de 16 mph. El ritmo récord para un maratón es poco más de 12 mph.

Otros animales van de lo lento (los perezosos de tres dedos que reptan a 0.07 mph, las tortugas gigantes que avanzan a 0.23 mph y las nutrias marinas que nadan a 6 mph) a lo muy rápido (ballenas asesinas y peces vela que nadan a 35 y 68 mph, respectivamente, y los chitas, que se ha informado que corren hasta a 68 mph). En 1973, el caballo Secretariat estableció el récord para el derby de Kentucky al correr  $1\frac{1}{4}$  millas en 1 minuto y 59.2 segundos, para una rapidez promedio de casi 38 mph. Se ha cronometrado que el aerodinámico halcón peregrino persigue a sus presas a 217 mph.

Nadie conoce el objeto que se mueve más lento. Un buen candidato para un movimiento natural es la deriva de un continente a 1 centímetro por año, o 0.7 milmillonésimas de una milla por hora. Hace algunos años se construyó una máquina para probar la corrosión por tensión que avanza a billonésimas de un milímetro por minuto, o 37 trillones de una milla por hora. ¡A esta rapidez tardaría 2000 millones de años para avanzar 1 metro!

## Rapidez con dirección



Hemos avanzado mucho al intentar representar el movimiento con exactitud. Sin embargo, cuando desarrollamos las reglas para explicar (y, por lo tanto, predecir) el comportamiento de los objetos en el capítulo siguiente, necesitaremos ir más lejos. Los objetos hacen más que acelerar y frenar. También puede cambiar de dirección, en ocasiones mantener la misma rapidez pero, otras veces, alterar la rapidez y su dirección. La rapidez promedio o la rapidez instantánea nos indican qué tan rápido se mueve un objeto, pero ninguna nos comunica la dirección del movimiento. Si hablamos de un viaje de vacaciones, la dirección no parece importante; es obvio que usted sabe en qué dirección viaja. Sin embargo, al intentar desarrollar reglas del movimiento para todas las situaciones, la dirección es tan importante como la rapidez. Puede percibir esto al recordar situaciones en las cuales ocurre un cambio abrupto en la dirección; por ejemplo, tal vez el carro que conduce se desvía brusca-

La velocidad es igual a la rapidez ➤  
con una dirección

mente. El chirrido de los neumáticos y la reacción de su propio cuerpo son señales de que participan factores nuevos cuando un objeto cambia de dirección.

En la visión del mundo de la física, combinamos la rapidez y la dirección en un concepto único llamado **velocidad**. Cuando hablamos de la velocidad instantánea de un objeto, proporcionamos la rapidez instantánea (por ejemplo, 15 mph) y simplemente agregamos la dirección (norte, a la izquierda, o 30 grados sobre la horizontal). La rapidez se conoce como la **magnitud** de la velocidad; indica su tamaño. Utilizamos el símbolo  $v$  para representar la magnitud de la velocidad instantánea.

Las cantidades que tienen un tamaño y una dirección se llaman **vectores**. Los vectores no obedecen las reglas de aritmética normales. En el capítulo 3, estudiaremos las reglas para combinar las cantidades de vectores. Por ahora, sólo importa comprender que la dirección del movimiento puede ser tan importante como la rapidez.

Esta es otra diferencia importante entre la rapidez promedio y la velocidad promedio, además de la dirección. La rapidez promedio se define como la distancia recorrida dividida entre el tiempo requerido, mientras que la **velocidad promedio** se define como el **desplazamiento** dividido entre el tiempo requerido. El desplazamiento es una cantidad de vector; su magnitud es la distancia en línea recta entre las ubicaciones inicial y final del objeto, y su dirección es de la ubicación inicial a la ubicación final.

La magnitud del desplazamiento es igual que la distancia recorrida por el movimiento a lo largo de una línea recta en una sola dirección. La magnitud del desplazamiento y la distancia recorrida difieren cuando el movimiento vuelve a desplazarse por una parte de su trayectoria en línea recta o cuando ocurre en más de una dirección. Por ejemplo, suponga que usted viaja una distancia de 10 kilómetros en dirección oeste, a lo largo de un tramo de camino recto, da la vuelta, y recorre 5 kilómetros en dirección este por el mismo camino. Ha viajado una distancia de 15 kilómetros, pero su desplazamiento es de 5 kilómetros al oeste; es decir, su ubicación final es 5 kilómetros al oeste de su ubicación inicial. Si el viaje tarda 1 hora, su rapidez promedio es 15 kilómetros por hora, y su velocidad promedio es 5 kilómetros por hora al oeste.

---

**Pregunta** Un automóvil viaja en dirección norte una distancia de 50 kilómetros, da la vuelta, y regresa al lugar inicial por la misma ruta. ¿Qué distancia viajó el automóvil y cuál fue su desplazamiento?

---

**Respuesta** El automóvil viaja una distancia de 100 kilómetros, pero tiene un desplazamiento de cero porque regresa a su punto inicial.

---

La magnitud de la rapidez promedio de un objeto es el cambio en la posición dividido entre el tiempo requerido para hacer el cambio:

velocidad promedio =  $\frac{\text{cambio en la posición}}{\text{tiempo requerido}}$  ➤

$$\bar{v} = \frac{\Delta x}{\Delta t}$$

Hemos usado  $x$  para representar la posición del objeto. El símbolo  $\Delta x$  se llama “delta equis”. El símbolo delta,  $\Delta$ , sirve para representar un cambio en una cantidad. Por lo tanto,  $\Delta x$  representa el cambio en la posición —el desplazamiento— y no debe considerarse como el producto de  $\Delta$  y  $x$ . Para calcular el desplazamiento, restamos la posición del objeto al inicio del intervalo de tiempo de su posición al final. Por ejemplo, si un automóvil viaja de la señal de la milla 120 a la señal de la milla 180, el desplazamiento es 180 millas – 120 millas = 60 millas. Observe que también hemos escrito el tiempo requerido como  $\Delta t$ , para indicar que es un intervalo de tiempo, y no un instante de tiempo.

Durante el resto de este capítulo, trataremos objetos que viajan en una sola dimensión. Pueden desplazarse a la izquierda y hacia la derecha, al este y al oeste, o arriba y abajo, pero no doblan las esquinas. Observe que al hacer esto, eliminamos movimientos tan sencillos como un cuadrangular. La ventaja es que aprendemos a manipular los conceptos nuevos antes de abordar situaciones más realistas, pero más difíciles.



## Razonamiento defectuoso



Un estudiante confundido declara, “Si la rapidez promedio durante un intervalo de tiempo se obtiene mediante  $\Delta x/\Delta t$ , la rapidez instantánea debe obtenerse mediante la posición instantánea dividida entre el tiempo instantáneo, o  $x/t$ ”.  
**¿Qué hay incorrecto en este razonamiento?**

**Respuesta** La rapidez instantánea es la rapidez promedio tomada durante un intervalo de tiempo muy pequeño. Aunque puede ser muy pequeño, todavía dividimos la distancia recorrida entre el intervalo de tiempo requerido para recorrer esta distancia. Observe que el uso de  $x/t$  puede generar respuestas muy absurdas. Por ejemplo, ¿qué ocurriría si usted fuera a la señal de la milla 678 en 2 segundos después de medianoche?

## Aceleración

Debido a que las velocidades de muchas cosas no son constantes, necesitamos una manera de describir cómo cambia la velocidad. Ahora definimos un concepto nuevo, llamado **aceleración**, el cual describe el ritmo al que cambia la velocidad. La magnitud de la **aceleración promedio** de un objeto es el cambio en su velocidad dividido entre el tiempo requerido para que ocurra ese cambio:

$$\bar{a} = \frac{\Delta v}{\Delta t}$$

$$\text{aceleración promedio} = \frac{\text{cambio en la velocidad}}{\text{tiempo requerido}}$$

Tal como hicimos con la rapidez, podemos hablar de la aceleración promedio o de la aceleración instantánea, dependiendo del tamaño del intervalo de tiempo.

Las unidades de la aceleración son un poco más complicadas que las de la rapidez y la velocidad. Recuerde que las unidades de la velocidad son la distancia dividida entre el tiempo: por ejemplo, millas por hora o metros por segundo. Debido a que la aceleración es el cambio en la velocidad dividido entre el intervalo de tiempo, sus unidades son (distancia por tiempo) por tiempo; por ejemplo, (kilómetros por hora) por segundo o (metros por segundo) por segundo.

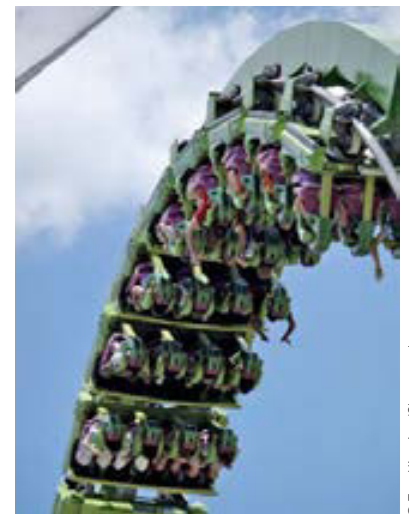
Es probable que conozca el concepto de aceleración. Se dice que un automóvil tiene “mejor aceleración” que otro. Esto suele significar que se obtiene una velocidad alta en menos tiempo. Por ejemplo, un Dodge Grand Caravan puede acelerar de 0 a 60 millas por hora en 11.3 segundos, un Ford Taurus requiere 8.7 segundos, y un Chevrolet Corvette sólo necesita 4.8 segundos.

**Pregunta** ¿Cuál automóvil tiene la aceleración promedio más alta?

**Respuesta** El Corvette tiene la aceleración promedio más alta porque alcanza 60 mph en el menor intervalo de tiempo.

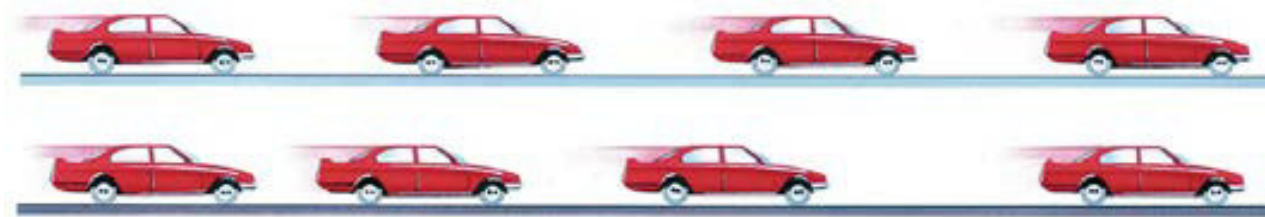
Otro modo de familiarizarse con la aceleración es experimentarla. Por ejemplo, cuando un elevador comienza a subir o bajar con rapidez, la sensación en su estómago se debe a que el elevador (y usted) cambian de velocidad. Los astronautas sienten esto cuando el transbordador espacial abandona su base de lanzamiento. Se obtiene ejemplos emocionantes del mismo efecto en una montaña rusa. De hecho, se puede decir que los parques de diversiones son lugares donde las personas pagan por experimentar los efectos de la aceleración.

En contraste, usted no siente el movimiento cuando viaja en línea recta a una velocidad constante; es decir, un movimiento con una aceleración cero. El movimiento que siente al viajar en un automóvil en una carretera recta se debe a las pequeñas vibraciones del automóvil. (Estas vibraciones son cambios mínimos en la dirección o pequeñas aceleraciones del automóvil debido a los baches del camino.)



© Tom Hirtreiter/Shutterstock

Los parques de diversiones venden la emoción de la aceleración.



**Figura 2-4** Dibujos de dos automóviles mediante un estroboscopio. ¿Cuál vehículo acelera y cuál viaja a una velocidad constante?

Si usted no acelera, sino observa un objeto móvil, ¿cómo puede saber si el objeto está acelerando? Un modo es tomar una fotografía estroboscópica de su movimiento. La figura 2-4 presenta dos de esas imágenes. ¿Cuál de las dos corresponde al vehículo que acelera?

Si respondió que el automóvil (b), comprende bastante bien la aceleración. El automóvil (a) recorre la misma distancia durante cada intervalo de tiempo y, por lo tanto, viaja a una velocidad constante. El vehículo (b) se desplaza más lejos durante cada intervalo de tiempo sucesivo; está acelerando.

Incluso si el automóvil frenara, estaría acelerando. (No solemos utilizar la palabra *desaceleración* en la física porque la palabra *aceleración* incluye frenar al igual que aumentar la rapidez.) En este caso, la distancia recorrida durante intervalos de tiempo sucesivos sería más corta. La aceleración se refiere a cualquier cambio en la rapidez o la dirección; es decir, a cualquier cambio en la velocidad.

---

**Pregunta** Usted observa dos automóviles lado a lado cuando salen de un túnel. El vehículo rojo tiene una velocidad de 40 metros por segundo y una aceleración de 20 (metros por segundo) por segundo. El coche azul tiene una velocidad de 20 metros por segundo y una aceleración de 40 (metros por segundo) por segundo. En el instante en que salen del túnel, ¿cuál vehículo rebasa al otro?

---

**Respuesta** El automóvil con la rapidez instantánea más alta recorrerá más camino en el siguiente intervalo de tiempo. Por lo tanto, el vehículo rojo rebasa al azul cuando salen del túnel. El carro azul tendrá el cambio más grande en el velocímetro en el siguiente intervalo de tiempo pequeño y en algún momento alcanzará y rebasará al vehículo rojo.

---

La aceleración es una cantidad de vector. Cuando la aceleración está en la misma dirección que la velocidad, aumenta la rapidez del objeto. Cuando la aceleración y la velocidad apuntan en direcciones opuestas, el objeto se frena. La idea de una aceleración que tiene una dirección puede parecer un poco abstracta y, tal vez, innecesaria. Es obvio que la velocidad de un automóvil tiene una dirección y es probable que parezca más fácil de comprender. Sin embargo, conforme continuamos nuestro estudio de la aceleración, veremos muchos ejemplos en los cuales la dirección de la aceleración tiene consecuencias físicas.

---

**Pregunta** ¿Cuál es un ejemplo cotidiano de algo que frena con un vector de aceleración que apunta hacia arriba?

---

**Respuesta** Si este “algo” frena, su vector de velocidad debe apuntar en la dirección opuesta a su vector de aceleración, o hacia abajo. Por lo tanto, buscamos algo que se dirija hacia el suelo y se frene. Esto puede ser un clavadista, después de que choca con el agua, o un paracaidista después de que se abre el paracaídas. Trate de pensar en otro ejemplo.

---

**SOLUCIÓN** | Aceleración

Considere un vehículo que avanza por una carretera recta a 40 mph y que acelera hasta 60 mph durante un intervalo de tiempo de 20 s. ¿Cuál es la aceleración promedio del automóvil?

Al utilizar los símbolos  $v_i$  y  $v_f$  para representar las velocidades inicial y final, tenemos

$$\bar{a} = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{v_f - v_i}{t_f - t_i} = \frac{60 \text{ mph} - 40 \text{ mph}}{20 \text{ s}} = \frac{20 \text{ mph}}{20 \text{ s}} = 1 \text{ mph/s}$$

El automóvil acelera a 1 (mph) por segundo; es decir, durante cada segundo, su velocidad aumenta 1 mph.

Por otra parte, si el vehículo hace este cambio de velocidad en 10 s, nuestro nuevo cálculo produciría una aceleración promedio de 2 mph/s. Estos cálculos ejemplifican que la aceleración es más que sólo un cambio en la velocidad; es una medida del ritmo al que cambia la velocidad.

## Una mirada inicial sobre los objetos que caen

Con estas pocas ideas, ahora podemos observar un movimiento común: una bola que cae cerca de la superficie de la Tierra. ¿Cómo cae la bola? ¿Desciende cada vez más rápido hasta que golpea el suelo? ¿O alcanza cierta rapidez y luego conserva esa rapidez durante la duración de su caída? ¿El ritmo al que cae depende de su peso? Por ejemplo, ¿una bala de cañón cae más rápido que una pluma?

Las preguntas acerca de este movimiento bastante sencillo han fascinado a los científicos desde cuando menos la época de Aristóteles (siglo IV A.C.). Resultan bastante difíciles de contestar. De hecho, las respuestas modernas a estas preguntas no se generaron hasta principios del siglo XVII.

Hasta esa época, las respuestas aceptadas eran las atribuidas a Aristóteles. Cada movimiento requiere un autor (objeto) y una meta hacia la que se mueve el objeto. Un objeto que cae desde cierta altura hacia su lugar de reposo natural sobre una tierra inmóvil —su meta— viajaría con una velocidad determinada por su altura dividida entre la resistencia del medio a través del cual viaja. Los objetos más pesados viajarían naturalmente más rápido que los ligeros. Los objetos mucho más pesados caerían todavía más rápido. Una bala de cañón caería más lento en melaza que en el aire. Una pluma caería aleteando en el aire, pero flotaría en la melaza. En la visión de Aristóteles, todo cambio era movimiento. Los cuerpos que caen eran sólo un ejemplo de cambio: un cambio de lugar. Los cambios de temperatura, color, o textura eran otros ejemplos de movimiento.

La ventaja del sistema de Aristóteles era que abordaba situaciones concretas y observables que encontramos todos los días. Esta ventaja condujo a discusiones serias y gratificantes durante los 1500 años siguientes. Grandes científicos, como Galileo, analizaron con atención las ideas de Aristóteles, las cuales incluían una predicción de que una roca de 10 libras caería bastante más rápido que una roca de 1 libra.

Usted puede efectuar un experimento equivalente para probar la teoría. Sostenga un libro pesado (un texto de física es bastante apropiado) y un pedazo de papel a alturas iguales sobre el piso y déjelos caer al mismo tiempo. ¿Cuál cae más rápido? Ahora repita el experimento, pero esta vez arrugue el papel en una bola apretada. ¿En qué difieren los resultados?

En el primer caso, el libro cayó mucho más rápido que el papel. Esta es una coincidencia cualitativa con la afirmación de Aristóteles. Pero el segundo caso ciertamente no coincide con Aristóteles. El uso de la regla aristotélica para predecir la caída del papel y el libro choca con la realidad. Si el libro es bastante más pesado que el papel, según Aristóteles, el libro debe caer con una rapidez mucho más



## GALILEO | Un genio inmoderado

El 15 de febrero de 1564, Galileo Galilei nació en Pisa, Italia, dentro de una familia de comerciantes de telas florentinos. Cuando era niño aprendió latín, griego y humanidades en el monasterio del lugar, hasta que su familia se trasladó a Florencia, en donde su padre asumió la educación del niño en matemáticas y música. El joven Galileo dominó el laúd mientras aprendía matemáticas avanzadas y astronomía.

Cuando tenía 17 años, Galileo regresó a su ciudad natal para estudiar medicina. Sin embargo, antes de concluir su capacitación, Galileo abandonó la escuela médica debido a conflictos con sus mentores provocados por su curiosidad por las ciencias. Cuando tenía 25 años, Galileo consiguió ayuda de los amigos de su padre en la aca-



Galileo Galilei

© North Wind Picture Archives

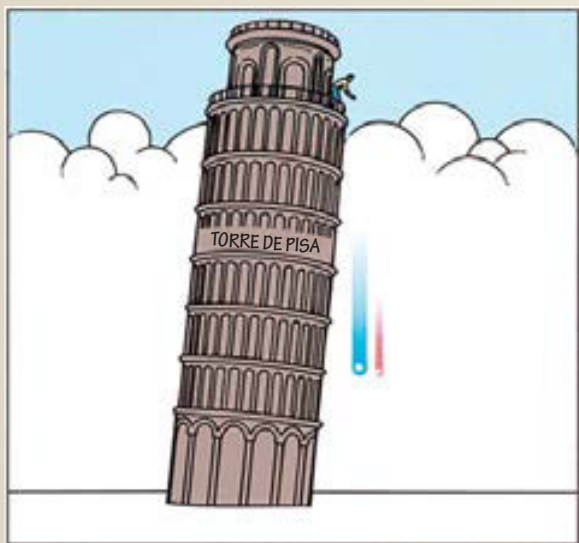
demia y recibió un nombramiento como profesor de matemáticas en la Universidad de Pisa. Le siguieron otros prestigiosos nombramientos cuando Galileo emprendió diversas búsquedas científicas.

Galileo estudió el tiempo, el movimiento, los cuerpos flotantes, la naturaleza del calor, y la construcción de telescopios y microscopios. En 1610, alcanzó la fama por mejorar los diseños anteriores de un telescopio; el suyo permitía amplificar el cielo hasta 32 veces. Galileo observó los rasgos de la Luna, las manchas solares, y algunos planetas, entre ellos Venus en sus diversas fases. Descubrió cuatro de las

lunas de Júpiter y demostró que la Vía Láctea estaba formada por una inmensa cantidad de estrellas.

Las numerosas observaciones de Galileo apoyaron la teoría del sistema solar centrado en el Sol (heliocéntrica) de Copérnico. Con esta idea, Galileo contradijo directamente el dogma de la Iglesia católica romana en esa época, que sostenía que la Tierra era el centro inmóvil del universo; dicho modelo, propuesto por Aristóteles, era apoyado por referencias bíblicas y se consideraba sagrado. La negación de esta visión se consideraba herejía, un delito que conllevaba el castigo máximo de ser quemado en la hoguera. En 1615, la Iglesia comenzó su investigación de las ideas de Galileo; en 1633, después de publicar *Diálogo acerca de los dos sistemas del mundo*, fue llevado a Roma, acusado de hereje, y sentenciado a cadena perpetua. Después, la sentencia fue conmutada a arresto domiciliario en su villa en Arcetri.

Sus últimos años, Galileo reflejó su vida en un manuscrito llamado *Discursos y descubrimientos matemáticos sobre dos ciencias nuevas*, el cual fue sacado de Italia de contrabando y fue publicado en Holanda en 1638. Las dos ciencias nuevas eran la dinámica y la resistencia de los materiales. Después de concluir este trabajo, Galileo quedó ciego y murió mientras todavía estaba bajo arresto domiciliario en 1642.



La leyenda dice que Galileo desarrolló sus ideas acerca de la caída libre al lanzar objetos desde la torre de Pisa.

Fuentes: S. J. Broderick, *Galileo: The Man, His Work, His Misfortunes* (Nueva York: Harper & Row, 1964); AIP Niels Bohr Library; Stillman, Drake, *Galileo at Work: His Scientific Biography* (Chicago: University of Chicago Press, 1978).

grande que el papel. Esto significa que el libro chocaría con el piso antes que el papel. Es evidente que Aristóteles se equivocaba.

Nuestro experimento con un libro y un papel puede llevarlo a creer que en ausencia de cualquier resistencia, como en el vacío, dos objetos caerían lado a lado, independientemente de sus pesos. Esto significa que una bala de cañón y una pluma caerían juntas en el vacío. Ésta fue la opinión de Galileo Galilei, un físico italiano del siglo XVII.

Se suele considerar a Galileo fundador de la ciencia moderna, debido tanto a su estilo de crear una visión del mundo de la física como a sus contribuciones particulares. Su estilo se caracterizó por un intenso deseo de verificar sus teorías con medidas; es decir, realizó experimentos para corroborar sus ideas. Su meta era sencilla: hallar las reglas de la naturaleza —a menudo en forma de ecuaciones— que expresaran los resultados de sus investigaciones.

Su obra condujo a algunas ideas nuevas acerca del movimiento. Desarrolló los conceptos y el lenguaje matemático necesario para describir el movimiento. Por ejemplo, inventó el concepto de aceleración.

Aunque Galileo no fue capaz de probar directamente sus ideas acerca de la caída libre, sugirió el experimento *imaginado* representado en la figura 2-5. Imagine que deja caer tres objetos idénticos al mismo tiempo desde la misma altura.





Un martillo y una pluma dejados caer en la Luna chocan con el suelo al mismo tiempo porque no hay aire.

Los aristotélicos coincidirían en que los objetos caerían uno junto a otro. Ahora imagine que repite el experimento pero con dos de los objetos cercanos entre sí. No cambió nada importante, de modo que otra vez ocurrirá un empate entre los tres. Por último, considere la situación en donde dos se tocan. Debido a que antes ocurrió un empate, ninguno arrastrará al otro, y de nuevo sucederá un empate. Pero si dos se tocan, se pueden considerar un solo objeto con el doble de tamaño. En consecuencia, los objetos grandes y pequeños caen a la misma velocidad.

Una prueba de esta idea común en la actualidad es dejar caer dos objetos, como una moneda y una pluma (de algún modo, una bala de cañón es poco práctica), dentro de un tubo plástico del cual se ha retirado del aire. En un vacío, esta carrera siempre termina en un empate. Los astronautas efectuaron una demostración ultramoderna de esto en la Luna, ya que como no hay atmósfera en la Luna, un martillo y una pluma caen al mismo tiempo.

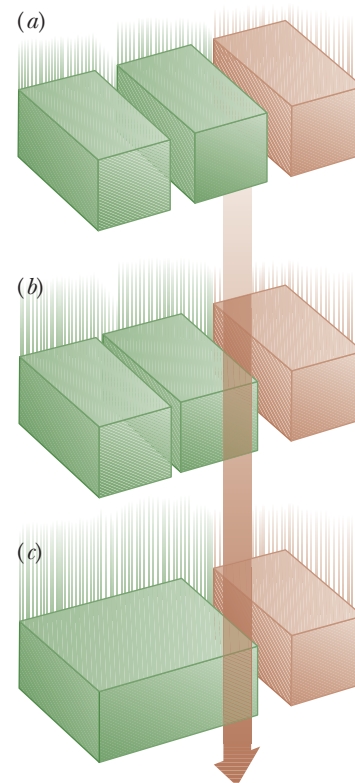
### FÍSICA | HÁGALO USTED MISMO

Compruebe la afirmación de Galileo de que dos objetos de pesos diferentes caen a la misma velocidad. Deje caer pelotas al mismo tiempo desde la ventana de un tercer o cuarto piso. ¿El aire hace que las pelotas caigan a velocidades diferentes? Estime los efectos de la resistencia del aire al dejar caer dos pelotas aproximadamente del mismo peso pero con tamaños diferentes, como una pelota de hule y una pelota de tenis.

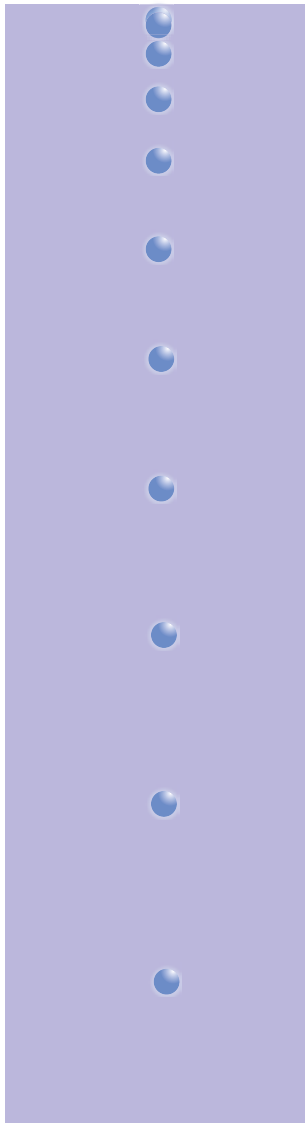
## Caída libre: Creación de una regla de la naturaleza

Si podemos hallar una regla para el movimiento de un objeto en caída libre, la regla será igualmente válida para todos los objetos, pesados o ligeros. Aunque obtendremos una regla que estrictamente hablando sólo es válida en un vacío, será útil en muchas otras situaciones; cada que se puedan ignorar los efectos de la resistencia del aire.

La medida cuantitativa de un objeto en caída libre era imposible con la tecnología de la época de Galileo. Las cosas simplemente ocurrían demasiado rápido. Para superar esto, estudió un movimiento muy similar a la caída libre, el de una pelota que iniciaba en reposo y rodaba por una rampa. Conforme la rampa se inclinaba más y más, aumentaba la velocidad de la pelota. Cuando la rampa está vertical, la pelota cae libremente. Galileo esperaba (correctamente) que podría ignorar las complicaciones del rodamiento y deducir la regla para la caída libre antes de que la rampa se volviera demasiado empinada y que el movimiento de la pelota fuera demasiado rápido para medirlo.



**Figura 2-5** El experimento imaginado por Galileo. Todos los objetos caen a la misma velocidad en el vacío.



© Humberto Núñez

**Figura 2-6** Esta fotografía estroboscópica de una pelota que cae muestra que tiene una aceleración constante.

Al experimentar con un solo ángulo de la rampa, Galileo descubrió que la pelota viajaba con una aceleración constante. Después de establecer esta regla en un solo ángulo, aumentó la inclinación de la rampa y volvió a comenzar. En ángulos más inclinados, encontró lo que cabría esperar de manera intuitiva: la pelota bajaba por la rampa en menos tiempo. Sin embargo, el descubrimiento emocionante fue que con cada nuevo ángulo de la rampa descubrió la *misma* regla: la aceleración era constante. Esta relación se mantenía *independientemente* del ángulo de la rampa, un hecho que fue crucial para el éxito de su propuesta para extrapolar estos resultados hacia una situación de caída libre. Dedujo correctamente que la pelota obedecería la misma relación si la rampa estuviera vertical.

Al aplicar técnicas modernas podemos tomar una fotografía estroboscópica (figura 2-6) de una pelota que cae y “ver” su movimiento. Es evidente que la pelota no se mueve a una velocidad constante. Sabemos esto porque las distancias entre las imágenes aumentan de manera continua. Como demostró Galileo, la pelota cae con una aceleración constante.

Una aceleración constante significa que la rapidez cambia la misma cantidad durante cada segundo. Por ejemplo, si encontramos que la velocidad de la pelota cambió cierta cantidad durante 1 segundo al inicio del vuelo, cambiaría la misma cantidad durante cualquier otro segundo de su vuelo.

Ahora sabemos que para el caso de una rampa vertical (caída libre) la aceleración es aproximadamente 9.8 (metros por segundo) por segundo (32 [pies por segundo] por segundo). Este valor se conoce como la *aceleración debido a la gravedad* y varía ligeramente de un lugar a otro en la superficie de la Tierra. Los estudiantes de la Montana State University en Bozeman han determinado que el valor de la aceleración debida a la gravedad en el sótano del antiguo edificio de física es 9.800 97 (metros por segundo) por segundo. Por conveniencia, en los cálculos normalmente redondearemos este valor a 10 (metros por segundo) por segundo.

En cualquier momento durante la caída, si conocemos su velocidad y su aceleración, podemos calcular qué tan rápido se moverá la pelota 1 segundo después. Suponga que la pelota viaja a 40 metros por segundo con una aceleración de 10 (metros por segundo) por segundo. Esta aceleración significa que la rapidez cambiará 10 metros por segundo durante cada segundo. Debido a que la pelota se acelera, 1 segundo después la pelota viajará con una velocidad de 50 metros por segundo. Un segundo después de eso, la rapidez será 60 metros por segundo, y así sucesivamente.

## ✓ MATEMÁTICAS

### SOLUCIÓN | ¿Debe usted saltar?

Usted está de pie en la parte superior de una cascada observando un profundo estanque de agua abajo. Sus amigos creen que es seguro saltar, pero a usted le preocupa que sea demasiado alto para sentirse cómodo. Recoge una roca y la dejar caer en el estanque. Cuenta “uno uno miles, dos uno miles, tres uno miles” y encuentra que la roca tarda en caer 3 s.

¿Qué tan rápido iría usted justo antes de chocar con el agua?

Cualquier objeto que cae, una roca o una persona, acelera 10 m/s por cada segundo que recorre (sin tomar en cuenta la resistencia del aire). Si usted salta con una rapidez inicial de cero, viajaría a 10 m/s después del primer segundo, a 20 m/s después del segundo segundo, y a 30 m/s (¡casi 70 mph!) justo antes de chocar con el agua. Le sugerimos que ponga sus dedos en punta.

¿Qué altura tiene la cascada?

La roca golpeó el agua al viajar a 30 m/s, pero es evidente que no viajó así de rápido toda la caída. La rapidez inicial de la roca era cero y aumentó de manera uniforme a 30 m/s. La rapidez promedio de la roca durante la caída fue 15 m/s (la mitad entre cero y 30 m/s) y la roca tuvo esta rapidez promedio durante 3 s. Eso significa que, en promedio, la roca cayó 15 m cada segundo durante 3 s, para un total de 45 m.

Como un ejemplo final de la caída libre, considere un paracaidista que salta desde un avión y decide no jalar el cordón del paracaídas hasta que hayan transcurrido 30 segundos. Nuestro paracaidista acelera a una velocidad de 10 metros por segundo cada segundo. Por lo tanto, al final de  $\frac{1}{2}$  minuto (suponiendo que el paracaidista pudiera resistir el jalar el cordón en ese tiempo) la velocidad será aproximadamente 300 metros por segundo. ¡Esto es alrededor de 675 mph! En realidad, como veremos en el capítulo 3, esta descripción de la caída libre es bastante imprecisa cuando se vuelve importante el efecto de la resistencia del aire.



La resistencia del aire evita que el paracaidista tenga una aceleración constante.

## FÍSICA | HÁGALO USTED MISMO

Sostenga un billete de un dólar en posición vertical. Haga que un amigo mantenga sus dedos pulgar e índice separados a cada lado de la mitad del billete. Dígale que puede conservar el billete si lo atrapa cuando usted lo suelte.

Para atrapar el billete, él debe ser capaz de reaccionar en 0.13 segundos. Muy pocas personas pueden hacer esto. Sin embargo, si es afortunado y prevé su movimiento, usted pierde. Si le permite poner sus dedos cerca de la parte inferior del billete, tiene 0.18 segundos para reaccionar. Muchas personas pueden hacer esto.

## Comienzo con una velocidad inicial

¿Qué sucede si el objeto ya está en movimiento cuando usted comienza sus observaciones? Por ejemplo, suponga que alguien lanza una pelota en forma vertical hacia arriba. Nuestra experiencia nos dice que se frenará, se detendrá, y luego caerá. Al examinar fotografías estroboscópicas de objetos lanzados hacia arriba en forma vertical se observa que el comportamiento del objeto que sube es simétrico al del objeto que cae. La velocidad cambia 10 metros por segundo durante cada segundo. De hecho, la fotografía estroboscópica de la figura 2-6 pudo ser la de una pelota que sube. (Por supuesto, lo que sube, debe bajar; al tomar fotografías, tendríamos que cerrar el obturador de la cámara antes de que la pelota comenzara a caer.)

Podemos utilizar la simetría entre el movimiento vertical hacia arriba y hacia abajo para responder la pregunta siguiente: Si usted lanza una pelota verticalmente hacia arriba con una velocidad inicial de 20 metros por segundo, ¿cuánto tardará en alcanzar su altura máxima? Si no tomamos en cuenta la resistencia del aire, sabemos que la pelota se frena 10 metros por segundo durante cada segundo. Por lo tanto, al final del segundo 1, irá a 10 metros por segundo. Al final de 2 segundos, tendrá una rapidez instantánea de cero. Por lo tanto, la pelota tarda 2 segundos en alcanzar la parte superior de su trayectoria.

**Pregunta** Si usted pudiera lanzar la pelota con una rapidez vertical de 40 metros por segundo, ¿cuánto tardaría en alcanzar su altura máxima?

**Respuesta** Tardaría 4 segundos en alcanzar su altura máxima.

## Un punto sutil

Detengámonos al final de este capítulo para destacar el hecho de que Galileo utilizó experimentos y su razonamiento para descubrir una pauta en la naturaleza. Pudo discernir el movimiento de los objetos sujetos sólo a la atracción de la gravedad de la Tierra. Con matemáticas simples y la regla que formuló Galileo, usted puede calcular el resultado de experimentos futuros. De una manera limitada pero muy real, puede predecir el futuro. Las predicciones basadas en esta regla no son del tipo bola de cristal popularizados en la ciencia ficción, sino representan un logro muy concreto. El descubrimiento de pautas y la creación de reglas de la naturaleza son fundamentales en los intentos de los físicos para crear una visión del mundo.



## Resumen

Comenzamos a crear una visión del mundo de la física con el estudio del movimiento, porque el movimiento es una característica dominante del universo. Podemos obtener información acerca del movimiento de los objetos a partir de fotografías estroboscópicas. La rapidez promedio  $\bar{s}$  de un objeto es la distancia  $d$  que recorre, dividida entre el tiempo  $t$  que tarda en viajar esta distancia,  $\bar{s} = d/t$ . Las unidades para la rapidez son la distancia dividida entre el tiempo, como metros por segundo o kilómetros por hora.

La rapidez instantánea es igual a la rapidez promedio tomada durante un intervalo de tiempo muy pequeño. La rapidez en una dirección específica se conoce como velocidad, una cantidad de vector.

El desplazamiento es una cantidad de vector que produce la distancia en línea recta y la dirección desde una posición inicial hasta una posición final. La velocidad promedio es el cambio en la posición —el desplazamiento— dividido entre el tiempo requerido,  $\bar{v} = \Delta x / \Delta t$ .

La aceleración es el cambio en la velocidad dividido entre el tiempo que tarda en ocurrir el cambio,  $\bar{a} = \Delta v / \Delta t$ . La aceleración es un vector. Las unidades para la aceleración son iguales a las de la rapidez dividida entre el tiempo, como (metros por segundo) por segundo o (kilómetros por hora) por segundo.

Galileo razonó que todos los objetos caen a la misma velocidad en ausencia de resistencia del aire. Además, descubrió que los objetos se mueven en caída libre a una aceleración constante de aproximadamente 10 (metros por segundo) por segundo.

## Capítulo 2



## Revisión

Podemos determinar cuánto tiempo tardará un tren en llegar a su destino si conocemos la rapidez promedio y la distancia que debe recorrer. El tiempo de viaje es igual a la distancia dividida entre la rapidez promedio.

## TÉRMINOS IMPORTANTES

**aceleración promedio:** El cambio en la velocidad dividida entre el tiempo que tarda en efectuarse el cambio,  $\bar{a} = \Delta v / \Delta t$ . Se mide en unidades como (metros por segundo) por segundo. Se produce una aceleración a partir de un cambio en la rapidez, un cambio en la dirección, o ambos.

**desplazamiento:** Una cantidad de vector que proporciona la distancia en línea recta y la dirección desde una posición inicial hasta una posición final.

**magnitud:** El tamaño de una cantidad de vector. Por ejemplo, la rapidez es la magnitud de la velocidad.

**rapidez instantánea:** La rapidez promedio durante un intervalo de tiempo muy pequeño. La magnitud de la velocidad instantánea.

**rapidez promedio:** La distancia recorrida dividida entre el tiempo requerido,  $\bar{s} = d/t$ . Se mide en unidades como metros por segundo o millas por hora.

**vector:** Una cantidad con una magnitud y una dirección. Son ejemplos el desplazamiento, la velocidad y la aceleración.

**velocidad promedio:** El cambio en la posición —el desplazamiento— dividido entre el tiempo requerido,  $\bar{v} = \Delta x / \Delta t$ .

**velocidad:** Una cantidad de vector que incluye la rapidez y la dirección de un objeto.

## PREGUNTAS CONCEPTUALES

Casi todas las preguntas y ejercicios están pareados, de modo que después de casi todas las preguntas y ejercicios con números impares hay otro similar con un número par. Al final de este libro se presentan respuestas breves para casi todas las preguntas y ejercicios con números impares. Las preguntas más desafiantes se señalan mediante un ▲.

1. Describa el movimiento representado en la imagen estroboscópica siguiente.

- 



© David Rogers

- ● ● ● ● ● ● ● ● ● ● ●

- ● ● ● ● ●    ● ● ●    ● ●    ● ●    ● ●

5. Trace un dibujo estroboscópico para la descripción siguiente de una oruga que avanza por una rama recta. La oruga comienza en reposo y acelera lentamente hasta una rapidez constante. Después frena a una rapidez constante más lenta. Por último, se cansa y se detiene a descansar.
6. Un automóvil avanza por una carretera recta con rapidez constante cuando choca con un montón de arcilla y grava, lo cual hace lento su avance. Después del choque, el conductor acelera hasta que va más rápido que antes de chocar contra el montón y luego establece el control de avance automático. Haga un dibujo estroboscópico de este movimiento.
7. Prepare una fotografía estroboscópica para una corredora que participa en una carrera de 100 yardas. Represente el movimiento de la corredora desde el disparo del inicio de la carrera hasta que se detiene después de cruzar la meta.
8. Un escalador en hielo cae de una cascada congelada hacia un enorme montón de nieve y gradualmente queda en reposo. Dibuje un diagrama estroboscópico del movimiento del escalador desde el momento que cae hasta que queda en reposo.
9. ¿Cuál tiene una rapidez promedio más alta?: un camión que viaja de la señal de la milla 83 a la señal de la milla 90 en 10 minutos, o un automóvil que viaja de la señal de la milla 122 a la señal de la milla 130 en 10 minutos.
10. ¿Cuál tiene una rapidez promedio más alta?: un automóvil que viaja de la señal de la milla 35 a la señal de la milla 41 en seis minutos, o un camión que viaja de la señal de la milla 68 a la señal de la milla 71 en tres minutos.
11. Usted conduce por un camino, con el control de avance automático establecido en 45 mph. Ve un conejo en el camino, pisa el freno, y detiene el automóvil. Mientras frena, ¿su rapidez promedio es mayor que, igual a, o menor que 45 mph?
12. En la fábula de Esopo de la tortuga y la liebre, la liebre “más rápida” pierde la carrera ante la lenta y perseverante tortuga. Durante la carrera, ¿cuál animal tiene la rapidez promedio más alta?
13. ¿Cuál tiene una rapidez promedio más alta?: un automóvil que viaja de la señal de la milla 100 a la señal de la milla 110 en 10 minutos, o un camión que viaja de la señal de la milla 120 a la señal de la milla 130 en 10 minutos.
14. ¿Cuál tiene una rapidez promedio más alta?: un camión que viaja de la señal de la milla 100 a la señal de la milla 110 en 10 minutos, o un automóvil que viaja de la señal de la milla 120 a la señal de la milla 130 en 10 minutos.
15. ¿Cuál tiene una rapidez promedio más alta?: un camión que viaja de la señal de la milla 100 a la señal de la milla 110 en 10 minutos, o un automóvil que viaja de la señal de la milla 120 a la señal de la milla 130 en 10 minutos.
16. ¿Cuál tiene una rapidez promedio más alta?: un camión que viaja de la señal de la milla 100 a la señal de la milla 110 en 10 minutos, o un automóvil que viaja de la señal de la milla 120 a la señal de la milla 130 en 10 minutos.
17. ¿Cuál tiene una rapidez promedio más alta?: un camión que viaja de la señal de la milla 100 a la señal de la milla 110 en 10 minutos, o un automóvil que viaja de la señal de la milla 120 a la señal de la milla 130 en 10 minutos.
18. ¿Por qué *no* es correcto decir que el tiempo es más importante que la distancia para determinar la rapidez?
19. Un conductor de un camión promedia 92 kilómetros por hora entre las 2 p.m. y las 6 p.m. ¿Puede determinar la rapidez del camión a las 4 p.m.?
20. Un maratonista anciano cubrió las primeras 20 millas de la carrera en 4 horas. ¿Puede determinar la rapidez con que corría cuando pasó el marcador de las 10 millas?
21. ¿Cuál de los siguientes sirve para medir una rapidez promedio: un cronómetro, un odómetro o un velocímetro?
22. ¿Cuáles son las unidades de las propiedades físicas medidas mediante un cronómetro, un odómetro y un velocímetro?
23. ¿Cuál es la diferencia esencial entre la rapidez y la velocidad?
24. Si le dicen que su automóvil viaja a 65 mph al este, ¿se enteran de la rapidez del vehículo o de su velocidad?
25. En los dibujos estroboscópicos siguientes, ¿cuál objeto tiene la mayor aceleración?
- a.
- b.
26. Los dibujos estroboscópicos siguientes representan los movimientos de los automóviles, a y b. ¿Durante cuál intervalo del movimiento de un automóvil la rapidez promedio del vehículo a es aproximadamente igual a la rapidez promedio del vehículo b?
- a.
- b.
27. ¿Cuál de los siguientes *no* puede considerarse un “acelerador” en un automóvil: el pedal de avance, el pedal de freno, o el volante?

28. ¿En qué sentido los frenos de su bicicleta se consideran un “acelerador”?
29. Suponga que un avión acelera de 550 a 555 mph, un automóvil acelera de 50 a 59 mph y una bicicleta acelera de 0 a 8 mph. Si los tres vehículos efectúan estos cambios en el mismo intervalo de tiempo, ¿cuál tiene la aceleración más alta?
30. Si un Acura Integra acelera de 0 a 60 mph en 4 segundos y un Dodge Stealth acelera de 20 a 75 mph en 4 segundos, ¿cuál tiene una aceleración más alta?
31. Una motocicleta se desplaza por una carretera recta con rapidez uniforme de 35 mph. Un automóvil deportivo comienza en reposo y acelera a 10 mph/s. ¿Cuál se moverá más rápido después de 3 segundos?
32. Un Dodge Caravan tiene una rapidez de 60 mph y una aceleración de 1 (mph) por segundo. Un Ford Taurus tiene una rapidez de 55 mph y una aceleración de 2 (mph) por segundo. ¿Cuál vehículo tiene la rapidez más alta después que han transcurrido 10 segundos?
33. Carlos y Andrea conducen por el mismo camino en la misma dirección, con Carlos detrás de Andrea. Carlos frena y Andrea acelera, sin embargo la distancia entre sus vehículos se reduce. Ofrezca un ejemplo para mostrar cómo puede ocurrir esto.
34. Mary y Nathan conducen en una carretera en la misma dirección. Exactamente al mediodía, los automóviles están uno al lado del otro. Mary viaja con una rapidez constante y Nathan acelera, no obstante, Mary rebasa a Nathan. Explique cómo puede ocurrir esto.
35. Cuando decimos que los objetos ligeros y los objetos pesados caen con la misma rapidez, ¿qué suponemos?
36. La caída libre cerca de la superficie de la Luna se puede describir como movimiento con una \_\_\_\_\_ constante.
37. Usted está de pie en un acantilado sobre el océano. Deja caer un guijarro, y choca con el agua 4 segundos después. Ignorando los efectos de la resistencia del aire, ¿qué tan rápido viajaba el guijarro justo antes de llegar al agua?
38. Usted lanza una pelota justo hacia arriba en el aire. El instante después de abandonar su mano, la rapidez de la pelota es 30 metros por segundo. Sin tomar en cuenta los efectos de la resistencia del aire, prediga ¿qué tan rápido viajará la pelota 1 segundo después?
39. ¿Qué ocurre a la aceleración de una pelota en caída libre si se duplica la masa de la pelota?
40. Dos pelotas tienen el mismo tamaño, pero están hechas de diferentes materiales: una es de hule y la otra de acero. ¿Cómo se comparan las aceleraciones después que se dejan caer?
41. Usted rebota en un trampolín mientras sostiene una bola de boliche. Cuando sus pies abandonan el trampolín, usted suelta la bola de boliche. ¿Usted se eleva a una mayor, a la misma, o a una menor altura que si siguiera sosteniendo la bola de boliche?
42. Usted rebota en un trampolín mientras sostiene una bola de boliche. Cuando sus pies abandonan el trampolín, usted suelta la bola de boliche. Cuando usted llega a su máxima altura, ¿la bola de boliche está arriba, a un lado, o debajo de usted?
43. Una moneda de un centavo y una pluma se colocan dentro de un cilindro largo, del cual se extrae el aire. Cuando se invierte el cilindro, ¿cuál llega primero a la parte interior: la moneda o la pluma?

44. La Luna es un buen lugar para estudiar la caída libre porque no tiene atmósfera. Un astronauta en la Luna dejó caer al mismo tiempo un martillo y una pluma desde la misma altura. ¿Cuál llegó primero al suelo?
45. ¿En qué se diferencian las ideas de Galileo y Aristóteles en relación con el movimiento de un objeto en caída libre?
46. Una hoja de papel y un libro caen a velocidades diferentes a menos que el papel se arrugue formando una pelota, como se observa en la figura. ¿Cómo explicarían esto Galileo y Aristóteles?



47. Un estudiante decide probar las ideas de Aristóteles y Galileo acerca de la caída libre al dejar caer al mismo tiempo una pelota de 20 libras y una pelota de 1 libra desde la parte superior de un elevador de granos. Las dos pelotas tienen la misma forma y tamaño. ¿Qué sucede en realidad?
48. Una pelota de tenis de mesa y una pelota de golf tienen aproximadamente el mismo tamaño, pero masas muy diferentes. ¿Cuál llega primero al suelo si se dejan caer al mismo tiempo desde un edificio alto? Considere los efectos de la resistencia del aire.



© George Sample

49. Una pelota de tenis de mesa y una canica se dejan caer una junto a la otra desde la parte superior del edificio de biología. ¿Cuál esfera tiene la aceleración más alta? No ignore los efectos de la resistencia del aire.
50. Una pelota de tenis de mesa y una canica se lanzan hacia arriba en el aire con la misma rapidez inicial. ¿Cuál esfera

tiene la aceleración más alta? Incorpore los efectos de la resistencia del aire.

51. Una pelota de hule duro rebota en el suelo. Compare la aceleración de la pelota mientras desciende con su aceleración mientras asciende.
52. ¿En qué se diferencia la aceleración de un cilindro que asciende por una rampa de uno que desciende por la rampa?
- ▲ 53. Si ignoramos la resistencia del aire, la aceleración de un objeto que cae es constante. ¿Cómo supone que cambiaría la aceleración si *no* ignoramos la resistencia del aire? Explique su razonamiento.
54. Si consideramos la resistencia del aire, ¿durante cuál de los primeros 5 segundos de caída libre cambia más la rapidez de una pelota?
55. Una pelota de hule se lanza directo hacia arriba en el aire con una rapidez inicial de 20 m/s. Si no ignoramos la resistencia del aire cuando la pelota se mueve hacia arriba, ¿la aceleración de la pelota es más grande, igual a, o menor que la aceleración debida a la gravedad?

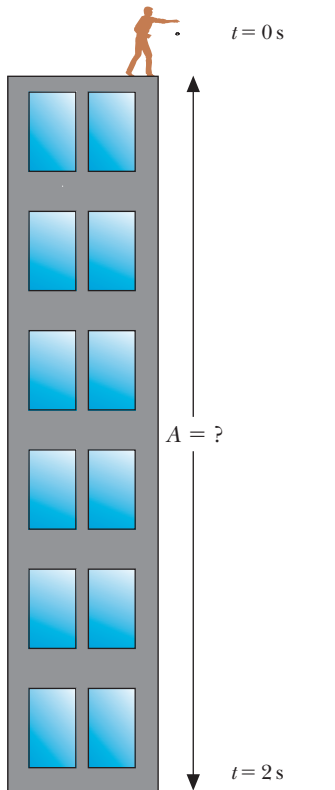
56. Cuando la pelota de las preguntas anteriores regresa al suelo, ¿su aceleración es mayor, igual, o menor que la aceleración debida a la gravedad?

- ▲ 57. Una carreta comienza en reposo y baja por una rampa con aceleración constante. La rapidez promedio de la carreta es proporcionada por la longitud de la rampa dividida entre el tiempo requerido para el viaje. Durante parte del viaje hacia abajo por la rampa la carreta se desplaza más lento que su rapidez promedio, y durante otra parte del viaje la carreta se mueve más rápido que la rapidez promedio. ¿La carreta alcanza la rapidez promedio cuando está a la mitad mientras baja por la rampa o cuando ha transcurrido la mitad del tiempo? Explique su decisión.
- ▲ 58. Una carreta comienza en reposo y baja por una rampa con aceleración constante. En algún instante en el tiempo, la rapidez instantánea de la carreta es igual a su rapidez promedio. En este instante en el tiempo, ¿la carreta está a menos de la mitad, exactamente a la mitad, o más adelante de la mitad mientras baja por la rampa? Explique su decisión.

## EJERCICIOS

1. La rapidez máxima del Blackbird es 2193 mph. Dado que 1 milla = 1.61 km, ¿cuánto es esta rapidez en km/h?
2. Los lanzadores profesionales destacados tienen un lanzamiento rápido de 100 mph. Dado que 1 mph = 0.447 m/s, ¿cuánto es esta rapidez en metros por segundo?
3. Exactamente al mediodía, usted pasa junto a la señal de la milla 50 en su automóvil. A las 2:30 p.m., se detiene a descansar en la señal de la milla 215. ¿Cuál fue la rapidez promedio durante este tiempo?
4. Con el fin de ser elegible para participar en el maratón de Boston, una carrera que cubre una distancia de 26.2 millas, un corredor debe ser capaz de finalizar en menos de 3 horas. ¿Cuál rapidez promedio mínima debe mantenerse para conseguir esto?
5. En 1933, Sue Ellen Trapp rompió el récord para mujeres en EUA para la carrera de 24 h al cubrir una distancia de 145.3 millas. ¿Cuál fue su rapidez promedio?
6. El récord mundial de la carrera de 10 000 metros es 26 min 22.75 s. ¿Cuál fue la rapidez promedio del corredor en m/s?
7. ¿Qué tan lejos viaja un autobús en 8 h a una rapidez promedio de 70 mph?
8. A una rapidez promedio de 10 m/s, ¿cuántos kilómetros puede viajar un ciclista en una jornada de 8 h?
- ▲ 9. Usted planeaba estar en la carretera a las 9 a.m., pero salió de casa hasta las 10 a.m. Después condujo con el control de avance automático establecido en 75 mph hasta detenerse al mediodía. ¿Cuál fue su rapidez promedio durante el intervalo de tiempo de las 9 a.m. al mediodía?
- ▲ 10. A partir de las 9 a.m. usted camina durante 3 h con una rapidez promedio de 4 mph. Se detiene para comer al mediodía y descansa hasta las 2 p.m. ¿Cuál fue su rapidez promedio durante el intervalo de las 9 a.m. a las 2 p.m.?
11. Si un chita corre a 30 m/s, ¿cuánto tardará en cubrir una distancia de 100 m? ¿Cómo se compara esto con los tiempos de las personas?
12. ¿Cuántas horas requeriría para hacer un viaje de 4400 kilómetros a través de EUA si promedia 90 km/h?
13. Si un corredor promedia 4 mph, ¿puede completar un ultramaratón de 100 millas en menos de 24 h?
14. Con una rapidez promedio de 125 mph, ¿cuánto tardaría un automóvil de carreras para terminar una carrera de 500 millas?
15. Si un Chevrolet Corvette puede acelerar de 0 a 60 mph en 4.8 s, ¿cuál es su aceleración promedio en mph/s?
16. Uno de los nuevos automóviles híbridos se detiene ante un semáforo. Cuando la luz cambia a verde, el conductor acelera a 25 mph en un tiempo de 6 s. ¿Cuál es la aceleración promedio del automóvil?
17. Un vehículo acelera de 40 a 70 mph para rebasar a un camión. Si esto requiere 6 s, ¿cuál es la aceleración promedio del automóvil?
18. El récord mundial para los dragsters de alto consumo de combustible es 4.477 s para recorrer  $\frac{1}{4}$  milla desde un punto inicial. El dragster viajaba a 332.75 mph al final del cuarto de milla. ¿Cuál fue la aceleración promedio del dragster? ¿Cuál fue su rapidez promedio?
19. Un escalador deja caer una clavija. Si la clavija pasa junto a usted con una rapidez de 7 m/s, ¿cuál será la rapidez de la clavija 2 s después?
20. Un reparador de techos deja caer un clavo que choca contra el suelo con una rapidez de 23 m/s. ¿Qué tan rápido viajaba el clavo 2 s antes de chocar contra el suelo?
21. Una niña que viaja en un trineo a 5 m/s rebasa a su hermanita. Si su aceleración promedio en la colina para trineo es 2 m/s<sup>2</sup>, ¿qué tan rápido viaja cuando rebasa a su hermano mayor 4 segundos después?
22. Usted lanza una pelota directo hacia arriba a 30 m/s. ¿Cuántos segundos transcurren antes de que caiga a 30 m/s?

23. Usted deja caer por accidente un reloj desde el techo de un edificio de seis pisos. Cuando recoge el reloj, observa que detuvo su marcha 2 s después que lo soltó. ¿Cuál es la altura del edificio?



24. Alguien deja caer una roca en una mina abandonada y 4 s después se escucha una salpicadura. Suponiendo que no es importante el tiempo que el sonido viaja por el tiro de la mina, determine la profundidad del tiro y la rapidez con que caía la roca cuando chocó con el agua.
25. Alguien deja caer una pelota desde una altura de 45 m. Prepare una tabla que muestre la altura de la pelota y su rapidez al final de cada segundo, hasta justo antes que la pelota choque con el suelo.
26. Una pelota se dispara verticalmente hacia arriba a una velocidad de 30 m/s. Genere una tabla que muestre la altura de la pelota y su velocidad al final de cada segundo, hasta justo antes que la pelota choque con el suelo.
- ▲ 27. Usted decide lanzar una pelota verticalmente de modo que un amigo que está 20 m arriba pueda atraparla. ¿Cuál es la rapidez de lanzamiento mínima que puede usar? ¿Cuánto tiempo después que lance la pelota la atrapará su amigo?
- ▲ 28. Una salva se dispara verticalmente hacia arriba desde un cañón con una velocidad de 40 m/s. ¿Cuánto tiempo está en el aire la salva? ¿Cuál es la altura máxima de la salva?



# 3 Explicación del movimiento



Cortesía de © U.S. Army Parachute Team, Golden Knights

*La resistencia del aire frena el descenso del equipo de paracaidismo del ejército de EUA, los Golden Knights.*

Un objeto que se mueve por un fluido debe luchar contra la resistencia a su movimiento. Por ejemplo, los ciclistas aerodinamizan sus bicicletas y su ropa para minimizar la resistencia del aire. Los efectos de la resistencia del aire son muy perceptibles cuando los paracaidistas abren sus paracaídas. La aceleración no es constante; de hecho, en algún momento la aceleración se vuelve cero. En ese momento, ¿qué le ocurre a la rapidez del objeto que cae?

---

Vea la respuesta a esta pregunta en la página 51.

---



¿A qué nos referimos con explicar el movimiento? ¿Acaso los movimientos no ocurren simplemente? Es probable que los filósofos hayan debatido estas preguntas durante horas. En la visión del mundo de la física, explicar algo significa crear un esquema, o modelo, que pueda predecir el resultado de los experimentos. Estos experimentos no tienen que ser complicados; pueden ser tan sencillos como lanzar una pelota de béisbol u observar un arco iris.

Los físicos intentan crear un conjunto de ideas que expliquen cómo puede funcionar el mundo. Tome nota de la palabra *puede*; no contamos con pruebas de que las ideas sean correctas o únicas. Pueden estar por descubrirse esquemas igualmente buenos (o mejores).

¿Es razonable esperar que existan reglas de la naturaleza? Parece que es posible reproducir los movimientos; es decir, si comenzamos con las mismas condiciones y aplicamos la misma acción a un objeto, obtenemos como resultado el mismo movimiento. Ocurre el mismo movimiento sin tomar en cuenta: (1) cuándo se hace el movimiento —los resultados del lunes coinciden con los del martes, y (2) si el experimento se hace en San Francisco o Filadelfia. (Imagine las consecuencias si esto no fuera cierto, y el “experimento” fuera lanzar una pelota de béisbol. ¡Los equipos necesitarían un lanzador diferente para cada día de la semana y para cada estadio!) Esta repetibilidad es una condición necesaria para intentar siquiera la búsqueda de un conjunto de reglas que obedece la naturaleza. Einstein reflejó esta idea cuando comentó que creía que Dios era sagaz, pero no malicioso. Quería decir que aunque las reglas de la naturaleza eran difíciles de encontrar, cuando las buscamos nos damos cuenta que no cambian.

## Una explicación inicial

Aristóteles desarrolló una explicación del movimiento que perduró casi 2000 años. Muchas de las ideas de Aristóteles se asemejaban al sentido común: se basaban en nuestras experiencias más comunes.

Aristóteles creía que el mundo estaba formado por cuatro elementos: tierra, agua, aire y fuego. Estos elementos eran los bloques de construcción del mundo material. Cada sustancia era una combinación específica de estos cuatro elementos. Si a usted esto le parece ingenuo, considere nuestra visión del mundo moderna. Tomamos elementos químicos, cada uno con sus propios atributos especiales, y los combinamos para formar compuestos que tienen atributos muy diversos. Por ejemplo, tomamos el hidrógeno, un gas muy explosivo, y el oxígeno, el elemento requerido para la combustión, y los combinamos para formar ¡el agua que usamos para combatir los incendios!

Cada elemento aristotélico tenía su propio lugar natural en la jerarquía del universo. La tierra, el más pesado, tenía la posición más baja. A continuación estaba el agua, luego del aire y el fuego. Aristóteles razonó que si cualquiera de éstos estaba fuera de su posición jerárquica, su movimiento natural sería regresar. Estos movimientos naturales ocurrían en líneas rectas, hacia y desde el centro de la Tierra.

Es interesante observar que, si usted intenta probar esta parte de la visión del mundo de Aristóteles, ¡funciona! Ponga un poco de agua y de tierra en un vaso y espere. Observe que cada elemento se asienta en su lugar natural (figura 3-1).

Para los movimientos diferentes a los naturales, es probable que Aristóteles lo desafiara a analizar sus propias experiencias. Para mover algo usted debe hacer un esfuerzo. Aunque hemos creado máquinas que hacen el esfuerzo por nosotros, todavía aceptamos que debe hacerse un esfuerzo y que, después de detener el esfuerzo, el objeto queda en reposo.

Aunque esto parece razonable, la explicación de Aristóteles tiene problemas. Por ejemplo, los objetos no se detienen de inmediato. Una flecha sigue en vuelo incluso después que ya no toca el arco. La explicación aristotélica invoca una interacción entre la flecha y el aire. Conforme la flecha avanza por el aire, crea un vacío parcial detrás de ella. El aire, al precipitarse tras la flecha para llenar el vacío, empuja la flecha y hace que continúe el movimiento. Sin embargo, esta explicación predice que el movimiento sin un esfuerzo es imposible en el vacío, al mismo tiempo que parece implicar que en el aire es perpetuo.



**Figura 3-1** En la visión del mundo aristotélico, el agua asciende, mientras que la tierra cae.

## Los inicios de nuestra explicación moderna

¿Cómo es el movimiento de un objeto cuando nada externo intenta cambiarlo? Uno puede suponer, de acuerdo con Aristóteles, que el único movimiento natural de un objeto es regresar a la Tierra; de lo contrario no tiene movimiento: permanece en reposo. Los pensadores medievales aceptaron que los objetos poseen esta tendencia a no moverse.

Efectuemos un experimento sencillo. Empuje un libro sobre una mesa o escritorio. Aunque el libro se desplaza en línea recta con cierta rapidez específica, pronto frena y se detiene. Parece natural que un objeto quede en reposo y se mantenga en reposo.

Permanecer en reposo es un estado natural. Sin embargo, existe otro estado de movimiento que es igual de natural, pero no tan obvio. Suponga que repite este experimento de empujar el libro sobre una superficie cubierta de hielo. El libro viajaría una distancia mucho mayor antes de quedar en reposo. Nuestra explicación de la diferencia entre estos dos resultados es que el hielo es más resbaladizo que el escritorio. Las diferentes superficies interactúan con el libro con fuerzas distintas. La interacción del libro con el hielo es menor que con la madera. ¿Puede predecir qué le ocurriría al libro si la superficie fuera perfectamente resbaladiza? El libro no frenaría en absoluto; se movería en línea recta a una velocidad constante para siempre. Dicho de otra manera, cuando la interacción se reduce a cero, el movimiento del libro es constante.

Por lo tanto, parece que un movimiento natural es aquel en el que la rapidez y la dirección son constantes. Observe que esta afirmación abarca al objeto ya sea que esté en reposo o en movimiento. Se requiere una interacción con un agente externo para hacer que un objeto cambie su velocidad. Si queda solo, varía naturalmente en su dirección inicial con su rapidez inicial.

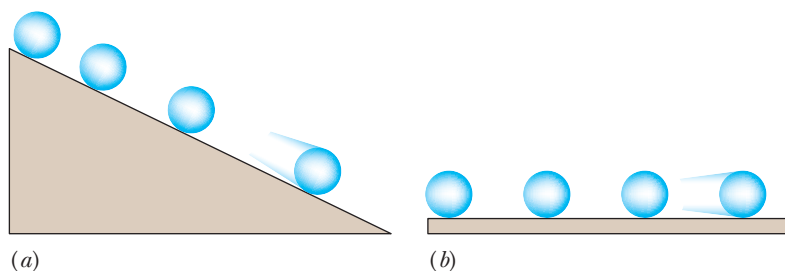
Galileo llegó a esta misma conclusión al deducir el resultado de un experimento pensado. Consideró que el movimiento de una pelota perfectamente redonda colocada sobre una superficie inclinada libre de “todos los obstáculos externos y accidentales”. Observó —se puede suponer que de las mismas experiencias que todos hemos tenido— que una pelota que rueda por una pendiente acelera (figura 3-2[a]). En caso contrario, si la pelota asciende por la pendiente, lo natural es que frene. Al bajar, la pelota experimenta una interacción sobre la pendiente que la acelera y al subir, consigue una interacción sobre la pendiente que la frena.

Galileo se preguntó, ¿qué ocurriría si la pelota se colocara sobre una superficie nivelada? Nada. Como la superficie no es una pendiente, la pelota no aceleraría ni frenaría (figura 3-2[b]). La pelota seguiría en movimiento para siempre.

Es importante recordar que este es otro experimento pensado de Galileo, y no un relato de un experimento real. Supuso que no habría interacción de resistencia entre la pelota y la superficie. No habría fricción. Al hacer esto pudo despojar al movimiento de sus aspectos terrenales y concentrarse en sus características esenciales.

Galileo fue el primero en sugerir que un movimiento con rapidez constante, en línea recta, era tan natural como un movimiento en reposo. Esta propiedad de estar en reposo o seguir moviéndose en línea recta a una rapidez constante se conoce como **inercia**.

El uso más común de la palabra *inercia* es para referirse a un estado emocional, el de sentirse indolente. Es común que las personas digan que algo tiene mucha



**Figura 3-2** El experimento pensado de Galileo. (a) En una superficie inclinada, la rapidez de una pelota cambia. (b) En una superficie nivelada, la rapidez y la dirección de una pelota son constantes.



© David Rogers

**Figura 3-3** El mantel puede jalarsse debajo de los platos debido a su inercia.

inercia por su dificultad para ponerse en movimiento. (En ocasiones se refieren a sí mismas.) Conforme usted genere una visión del mundo a partir de la física, es importante que diferencie el uso de las palabras en la cotidianeidad y dentro de la física.

Usted ya tiene un vasto conjunto de experiencias directamente relacionadas con la inercia tal como se utiliza aquí. Si algo está en reposo, recibe una interacción de algún tipo para ponerse en movimiento. Un mago usa la propiedad de la inercia de los vasos y los platos cuando jala abruptamente un mantel debajo de ellos. Si el mantel es suficientemente resbaladizo, la interacción con los objetos será mínima, y los platos permanecerán (casi) en reposo. La figura 3-3 muestra fotografías de antes y después de este truco.

### FÍSICA | HÁGALO USTED MISMO

Impresione a sus amigos al jalar un mantel bajo algunos platos. Para aumentar sus probabilidades de evitar un desastre, haga lo siguiente: utilice una tela resbaladiza y sin costuras de alrededor del tamaño de una funda de almohada. No sienta temor; jale el mantel rápidamente en dirección hacia abajo desde el borde recto de la mesa. Elija algunos platos que sean estables (y económicos).

Otro ejemplo de lo fascinante que puede ser la inercia es el forzado de circo que se jacta de su fuerza al pedir a alguien que lo golpee en la cabeza con un martillo. El forzado siempre hace esta demostración con un pesado y enorme bloque sobre su cabeza. La inercia del bloque es bastante grande, de modo que el golpe del martillo lo mueve poco. El feliz forzado sólo tiene que ser lo bastante fuerte para sostener el bloque.

Pero la inercia es mucho más que mantener las cosas en movimiento. Si algo está siempre en movimiento, es difícil frenarlo o acelerarlo. Un ejemplo es secarse las manos húmedas sacudiéndolas. Cuando usted detiene sus manos de manera abrupta, el agua prosigue su movimiento y se aleja de sus manos. De igual modo, el cinturón de seguridad de un asiento contrarresta la tendencia inercial de su cuerpo de continuar avanzando con una rapidez constante cuando el vehículo se detiene de repente.

Sin embargo, no todos los objetos tienen la misma inercia. Por ejemplo, imagine que intenta detener una pelota de béisbol y una bala de cañón, cada una de las cuales avanza a 150 kilómetros por hora (esa es la rapidez con que lanza un jugador de las Ligas Mayores). La bala de cañón tiene más inercia y, como puede suponer, requiere un esfuerzo mucho más grande para detenerse. Por el contrario, si usted fuera quien intentara lanzarla, le resultaría mucho más difícil hacer que se moviera la bala de cañón.

**Pregunta** ¿Cuál es la principal diferencia entre el uso cotidiano de la palabra *inercia* y su uso en física?

**Respuesta** El uso en física también incluye la idea de que los objetos tienden a mantener su movimiento.

Aunque Galileo no explicó por completo el movimiento, dio el primer paso importante y, al hacerlo, cambió radicalmente el modo en que consideramos el movimiento de los objetos. Su obra influyó profundamente en Isaac Newton, quien originó las reglas del movimiento de la actualidad.

## Primera ley de Newton

Isaac Newton, inglés, nació pocos meses después del fallecimiento de Galileo. Aunque es probable que sea más conocido por sus trabajos sobre la gravitación, su contribución más profunda para la visión de nuestro mundo moderno son sus tres

## NEWTON Brillantez diversificada

El 25 diciembre de 1642, nació Isaac Newton en Woolsthorpe en Linconshire, Inglaterra. El padre de Newton, un caballero rural en Linconshire, murió tres meses antes de que él naciera, por lo cual quedó al cuidado de su madre. Cuando él tenía tres años, su madre se casó con un pastor local, y se trasladó a algunas millas de distancia, con lo cual el joven Newton quedó al cuidado del ama de llaves.

A la edad de 14 años, Newton regresó de la escuela a su casa a solicitud de su madre, para trabajar en la granja de la familia. Sin embargo, demostró que no era un buen granjero y dedicaba casi todo su tiempo a leer. Cuando podía estar solo, Newton se divertía con la construcción de molinos de viento a escala propulsados por ratones, relojes de agua, relojes de sol, y papalotes que portaban linternas amenazadoras, las cuales atemorizaban a los campesinos. Un maestro del lugar reconoció las habilidades de Newton y lo ayudó a inscribirse en el Trinity College, en Cambridge, a la edad de 18 años, donde obtendría una licenciatura en artes 4 años después, en 1665.

Más adelante ese mismo año, la peste bubónica asoló la campiña inglesa y, por tal razón, la universidad fue cerrada. Newton regresó a Woolsthorpe, y los 18 meses siguientes resultaron los más productivos de su vida. Durante este interludio, Newton desarrolló sus teorías e ideas acerca de la óptica, la mecánica celeste, el cálculo, las leyes del movimiento, y sus famosas leyes de la gravedad. Después de la peste, Newton regresó a Cambridge, donde fue nombrado profesor de matemáticas a la edad de 26 años. A partir de ahí, Newton siguió desarrollando un telescopio de refracción, en el cual utilizaba un espejo para reunir la luz, en lugar de una lente, la cual se usaba en los modelos anteriores.



Isaac Newton

© Georgios Kollidas/Shutterstock

Newton también publicó su libro más notable —con ayuda de Edmund Haley— titulado *Principia Mathematica Philosophiae Naturalis* (*Principios matemáticos de filosofía de la naturaleza*) en 1687.

En 1701, Newton fue nombrado maestro del invento, y en 1703 fue electo presidente de la Royal Society, puesto que conservó hasta su muerte. Sin embargo, los honores de Newton no terminan ahí; en 1705, la reina Anne lo nombró caballero como reconocimiento a sus numerosos logros, con lo cual su nombre cambió a Sir Isaac Newton. Ésta fue la primera vez que alguien fue nombrado caballero por

logros científicos.

La vida de Sir Isaac Newton no fue todo descubrimientos y honores. De hecho, gran parte del final de su vida mantuvo disputas con sus colegas científicos. Robert Hooke acusó a Newton de robar algunas de sus ideas acerca de la gravedad y la luz. Newton también riñó con aspereza con Gottfried Leibniz, matemático alemán que afirmaba haber desarrollado primero el cálculo, y con Christiaan Huygens, quien trabajó de manera independiente en la teoría de ondas de la luz. En 1727, Sir Isaac Newton enfermó seriamente, y el 20 de marzo falleció uno de los más grandes físicos de todos los tiempos. Se le concedió un funeral de estado y fue enterrado en la nave de la Abadía de Westminster: un alto y raro honor para un plebeyo.

Fuentes: Adaptado de R. A. Serway y J. S. Faughn, *College Physics* (Filadelfia: Saunders, 1992). También AIP Niels Bohr Library; F. E. Manuel, *A Portrait of Isaac Newton* (Cambridge, Mass.: Harvard University Press, 1968); Richard S. Westfall, *Never at Rest: A Biography of Isaac Newton* (Cambridge, Reino Unido: Cambridge University Press, 1980).

leyes del movimiento. Igual que a Galileo, a Newton le interesaban las interacciones que ocurren mientras un objeto está en movimiento, más que en su destino final. Formuló las observaciones de Galileo en lo que ahora se llama la **primera ley del movimiento de Newton**. También se conoce como la **ley de la inercia**.

La velocidad de un objeto permanece constante, a menos que una fuerza desequilibrante actúe sobre el objeto.

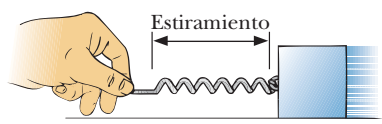
◀ Primera ley de Newton

Para que la velocidad de un objeto permanezca constante, tanto su rapidez como su dirección deben mantenerse constantes. Observe que esta ley se aplica al caso especial de un objeto en reposo: un objeto en reposo permanece en reposo, a menos que una fuerza desequilibrante actúe sobre él.

La primera ley incorpora la idea de la inercia de Galileo e introduce un concepto nuevo, la **fuerza**. En la visión del mundo newtoniana, el libro que se desliza sobre el escritorio se frena y se detiene debido a que existe una fuerza (llamada fricción) que se opone al movimiento. Asimismo, una roca que cae acelera porque existe una fuerza (llamada gravedad) que cambia de manera continua su rapidez. En resumen, no existe aceleración a menos que ocurra una fuerza neta, o desequilibrante.

Todos comprendemos de manera intuitiva las fuerzas; en términos comunes, una fuerza es un impulso o una atracción. Pero debe observarse que el concepto de fuerza es un concepto humano. Debido a que hemos crecido con fuerzas como parte de nuestra visión del mundo personal, casi todos nos sentimos cómodos con ellas. Pero en realidad no *observamos* las fuerzas. Vemos que los objetos se comportan de cierta manera, y deducimos que está presente una fuerza. De hecho, se han





**Figura 3-4** El estiramiento de un resorte es una medida de la fuerza aplicada.



**Figura 3-5** Las fuerzas iguales que actúan en direcciones opuestas se cancelan, y el carro no acelera.

desarrollado visiones alternas del mundo que no incluyen el concepto de fuerza. Sin embargo, este concepto fue de gran utilidad para el proceso de crear una visión del mundo de la física.

Aunque el concepto de fuerza incluye más que nuestras ideas intuitivas de impulso y atracción, estas ideas sirven como un inicio. Una fuerza se puede definir en términos de la conducta observada de los objetos. Por ejemplo, un medidor de fuerza (figura 3-4) construido con ligas elásticas o resortes nos permitiría cuantificar nuestras observaciones de fuerza al medir la cantidad de estiramiento mediante una escala arbitraria. Tendremos mucho más que decir de estos dispositivos después que conozcamos la segunda ley de Newton.

Otra característica importante de las fuerzas es que son direccionales, lo que significa que la dirección de la fuerza es tan importante como su magnitud. Se obtienen resultados diferentes de fuerzas de la misma medida que se aplican en direcciones distintas. Imagine que un patinador se desliza sobre el hielo. Una fuerza en la dirección del movimiento original aumenta la rapidez del patinador. Una fuerza aplicada en la dirección opuesta, lo frena. De modo que necesitamos incorporar esta diferencia al momento de comprender el movimiento. Como puede suponer del análisis en el capítulo 2, conseguiremos esto al tratar las fuerzas como vectores.

Recuerde que la primera ley de Newton se refiere a una fuerza *no desequilibrante*. En muchas situaciones, más de una fuerza actúa sobre un objeto. Existe una fuerza desequilibrante sólo si la suma de las fuerzas es *diferente* de cero. Cuando dos fuerzas de igual magnitud actúan a lo largo de una línea recta, pero en direcciones opuestas, se cancelan entre sí. En este caso, las fuerzas tienden a estirar o comprimir el objeto, pero la fuerza no desequilibrante, o *neta*, es cero. Cada uno de los “colaboradores” de la figura 3-5 puede ejercer una fuerza muy grande, pero si las fuerzas son iguales en magnitud y opuestas en dirección, no existe una fuerza desequilibrante sobre el carro.

También es cierto lo contrario. Cuando observamos un objeto sin aceleración, deducimos que no hay una fuerza desequilibrante sobre ese objeto. Si observa un automóvil que avanza con una rapidez constante por un camino recto y nivelado, usted deduce que las fuerzas de fricción equilibran las fuerzas de propulsión. Esto no quiere decir que no actúan fuerzas sobre el automóvil, porque hay muchas. El punto crucial es que la suma de todas estas fuerzas es cero; sobre el vehículo no actúa una fuerza desequilibrante, o *neta*.

**Pregunta** ¿Cuál es la fuerza neta que actúa sobre un avión en un vuelo nivelado a 500 mph en dirección este?

**Respuesta** Debido a que la rapidez y la dirección son constantes, no hay aceleración, y la fuerza neta debe ser cero.

## Suma de vectores

Los matemáticos han desarrollado reglas para combinar las cantidades de vectores, como los desplazamientos, las velocidades, o las fuerzas. Podemos representar

cualquier vector mediante una flecha; su longitud representa la magnitud de la cantidad, y su dirección representa la dirección de la cantidad. Para concluir esta representación, asignamos una escala conveniente a nuestro dibujo. Por ejemplo, suponemos que 1 centímetro en el dibujo de la figura 3-6 representa una distancia de 20 metros sobre el terreno. Entonces una flecha de 4 centímetros de longitud representa un desplazamiento de 80 metros en la dirección a la que apunta la flecha.

**Pregunta** ¿Cuántos metros representaría una flecha de 10 centímetros?

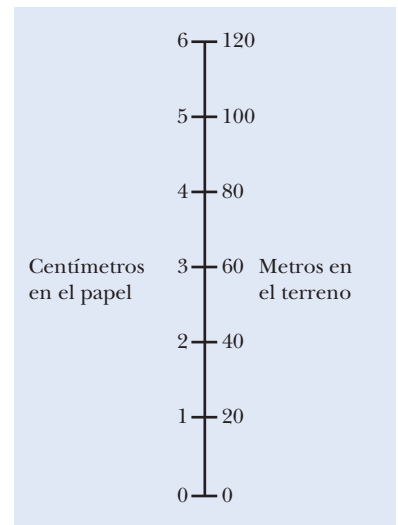
**Respuesta** Debido a que cada centímetro representa 20 metros, una flecha de 10 centímetros representa 200 metros.

En algunos textos, las cantidades de vector se representan con símbolos en negritas (como  $\mathbf{x}$ ) y en los materiales manuscritos con una flecha sobre el símbolo (como  $\vec{x}$ ). El tamaño o magnitud de la cantidad de vector se representa mediante un símbolo en cursivas. Por lo tanto, una fuerza se describe como  $\mathbf{F}$ , y su magnitud se describe como  $F$ .

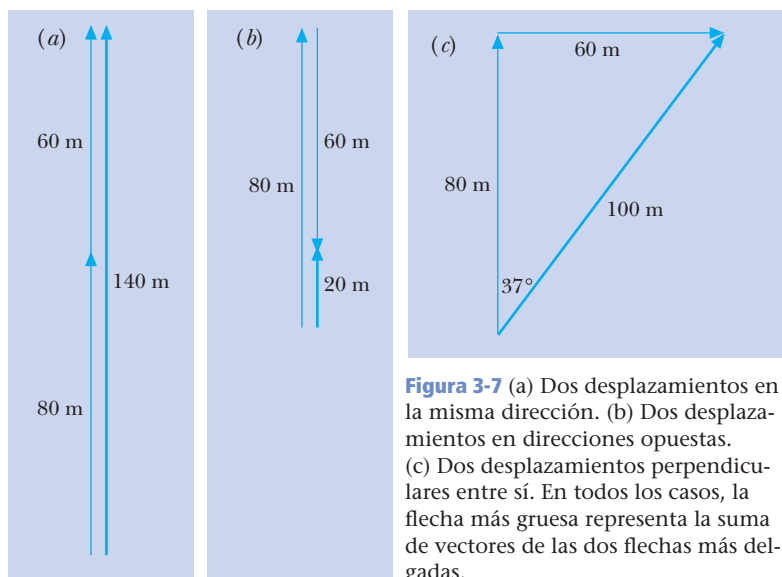
Es posible combinar los vectores mediante un método gráfico y la escala presentada en la figura 3-6. Supongamos que usted camina una distancia de 80 metros en dirección norte. Este desplazamiento se representa mediante una flecha de 4 centímetros de longitud que apunta hacia arriba de la página. Después sigue caminando en dirección norte otros 60 metros. Este desplazamiento se representa mediante una flecha de 3 centímetros de longitud que apunta hacia arriba de la página. Su desplazamiento total son 140 metros dirección norte. Observe en la figura 3-7 (a) que esto se representa de manera gráfica al dibujar la segunda flecha a partir de la cabeza de la primera flecha, igual que su segundo desplazamiento comenzó al final del primero. La suma de las dos flechas es la flecha dibujada de la base de la primera flecha a la punta de la segunda. En este caso, la flecha que representa la suma tiene 7 centímetros de longitud, apunta hacia el norte, y representa un desplazamiento de 140 metros en dirección norte.

Ahora digamos que usted camina 80 metros en dirección norte, da la vuelta, y camina 60 metros en dirección sur por la misma trayectoria. ¿Cuál es su desplazamiento? Usted está a 20 metros norte de su punto inicial, de modo que su desplazamiento son 20 metros norte. Esto se presenta de manera gráfica en la figura 3-7 (b).

La tercera vez, usted camina 80 metros en dirección norte, da vuelta a la derecha, y camina 60 metros en dirección este. Para hallar su desplazamiento en el suelo, puede colocar estacas en sus puntos inicial y final, medir la distancia en-

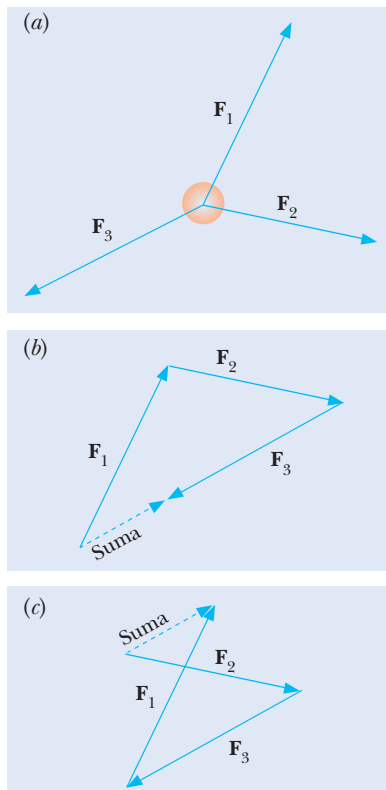


**Figura 3-6** Una escala para vectores de desplazamiento. Un centímetro en el papel representa 20 metros en el terreno.



**Figura 3-7** (a) Dos desplazamientos en la misma dirección. (b) Dos desplazamientos en direcciones opuestas. (c) Dos desplazamientos perpendiculares entre sí. En todos los casos, la flecha más gruesa representa la suma de vectores de las dos flechas más delgadas.





**Figura 3-8** Las tres fuerzas (a) que actúan sobre la pelota se pueden sumar (b) para hallar la fuerza neta. (c) No importa el orden en que se suman las fuerzas.

tre las estacas, y utilizar una brújula para obtener la dirección de la estaca inicial a la estaca final. De manera gráfica, dibujamos una flecha de 4 centímetros que apunta hacia arriba de la página. Después dibujamos una flecha de 3 centímetros hacia la derecha, igual que la figura 3-7 (c). El desplazamiento es la flecha dibujada de la base de la primera flecha a la punta de la segunda, como se observa. Para obtener el desplazamiento, se mide la longitud de la flecha. Se obtienen 5 centímetros, lo cual indica que la distancia son 100 metros. Después utilizamos un transportador para medir el ángulo indicado, y obtenemos 37 grados. Por lo tanto, se tiene un desplazamiento de 100 metros a 37 grados este del norte.

Este método para sumar vectores se generaliza con facilidad a más de dos vectores. Después de dibujar la primera flecha, cada flecha sucesiva se dibuja comenzando en la punta de la flecha anterior. La flecha dibujada de la base de la primera a la punta de la última representa la suma de vectores. El orden de las flechas no afecta la respuesta final.

Cuando más de una fuerza actúa sobre un objeto, podemos determinar la fuerza neta que actúa sobre el objeto al sumar todas las fuerzas con el método recién escrito. Considere las tres fuerzas que actúan sobre la pelota presentada en la figura 3-8 (a). Para sumar estas fuerzas, movemos  $\mathbf{F}_2$  (sin cambiar su dirección) y ponemos su base en la punta de  $\mathbf{F}_1$ , como se observa en la figura 3-8 (b). Después colocamos la base de  $\mathbf{F}_3$  en la punta de  $\mathbf{F}_2$ . La suma de estas tres fuerzas es la flecha de la base de  $\mathbf{F}_1$  a la punta de  $\mathbf{F}_3$ . La magnitud de la fuerza se determina con la escala utilizada en el dibujo, y la dirección se determina con un transportador.

## Segunda ley de Newton

La primera ley de Newton nos dice lo que ocurre cuando una fuerza neta no actúa sobre un objeto: no cambian la rapidez ni la dirección. Si hay una fuerza neta, el objeto acelera y, por lo tanto, cambia su velocidad. La segunda ley de Newton describe la relación entre una fuerza neta y la aceleración resultante.

Nuestro descubrimiento de la segunda ley nos presentará algunos experimentos simples que ilustran la relación antes que la declaremos de manera formal. Suponga que tenemos un conjunto de resortes idénticos (los medidores de fuerzas mencionados antes), un conjunto de objetos, y todo el equipo necesario para medir aceleraciones. Suponga además que si estiramos un resorte una cantidad fija y mantenemos el estiramiento, el resorte ejerce una fuerza constante.

Debido a que la segunda ley describe la fuerza neta, necesitamos una situación en la cual las fuerzas friccionales sean tan mínimas que sea posible no tomarlas en cuenta, y las demás fuerzas están equilibradas, de modo que las fuerzas que aplicamos son las únicas que afectan la aceleración. Una mesa de hockey de aire horizontal es una buena superficie experimental. El disco viaja sobre un colchón de aire, de modo que experimenta fuerzas friccionales mínimas.

Si atraemos un disco de hockey con un resorte estirado una cantidad fija y mantenemos la dirección y la cantidad de fuerza incluso mientras se mueve el disco, encontramos que el disco experimenta una aceleración constante. Además, el movimiento de la aceleración siempre es en la misma dirección que la fuerza neta.

Ahora comparemos los resultados obtenidos cuando atraemos el disco con un resorte con lo que sucede cuando atraemos el disco con dos resortes. Cuando dos resortes atraen uno junto al otro, como en la figura 3-9, la fuerza es el doble que la de un solo resorte. Si estiramos los dos resortes la misma cantidad que antes, encontramos que producen el doble de aceleración. Si aplicamos tres resortes, generan el triple de aceleración, y así sucesivamente. En general, encontramos que la aceleración de un objeto es **proporcional** a la fuerza neta que actúa sobre él. Esta relación será parte de la segunda ley.

Pero la historia está incompleta. Imagine que impulsa una bala de cañón con la misma fuerza utilizada sobre el disco de hockey. La intuición nos dice que la aceleración de la bala de cañón será menor. Si le piden una explicación, puede responder, "Porque la bala de cañón está más cargada", o "Pesa más". Pronto veremos que, aunque el término *pesar* no es técnicamente correcto, la intuición nos lleva en la dirección correcta.



© David Rogers

**Figura 3-9** Dos resortes que atraen uno junto al otro ejercen el doble de fuerza que un resorte, tal como se aprecia en las lecturas de la regla de medición.

Reforzamos esta intuición al investigar cómo la aceleración de un objeto depende de la cantidad de materia en el objeto. La **masa** de un objeto es una medida de la cantidad de materia en el objeto. Suponemos que las masas se combinan del modo más sencillo posible: las masas se suman. Por lo tanto, la masa combinada de dos objetos idénticos es el doble de la masa de uno de ellos.

De nuevo, aplicamos un resorte para atraer uno de los discos de hockey y registrar su aceleración. Después observamos la aceleración de dos discos (atados juntos) atraídos por un solo resorte. Si el resorte se estira la misma magnitud que antes, la aceleración es la mitad de la original. Asimismo, un resorte que atrae tres discos genera un tercio de aceleración, y así sucesivamente. La masa y la aceleración son **inversamente proporcionales**, en donde *inversamente* indica que los cambios en los dos valores son opuestos entre sí. Si la masa *aumenta* cierto múltiplo, la aceleración producida por la fuerza se *reduce* entre el mismo múltiplo.

Observe que entre más masa tiene un objeto, más fuerza se requiere para producir una aceleración específica. Esto significa que un objeto tiene más inercia. Por lo tanto, aceptamos que la masa de un objeto es la medida de la cantidad de inercia que posee el objeto.

Newton reúne las dos ideas anteriores en una de las leyes de la naturaleza física más importantes que alguna vez se haya propuesto. Esta ley afirma que la aceleración de un objeto es igual a la fuerza neta sobre el objeto dividida entre su masa inercial y se escribe de manera simbólica como

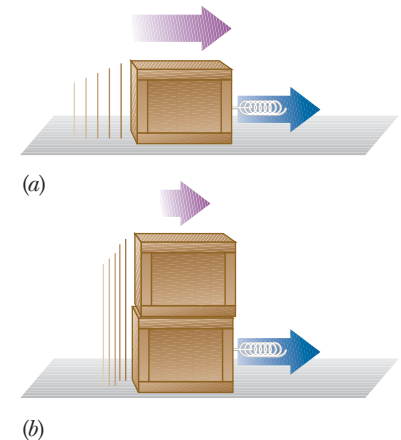
$$\mathbf{a} = \frac{\mathbf{F}_{\text{neto}}}{m}$$

en donde hemos escrito la aceleración y la fuerza neta como vectores para hacer hincapié en que siempre apuntan en la misma dirección.

Cualquier ecuación matemática de ese tipo puede reordenarse mediante álgebra. La **segunda ley del movimiento de Newton** se suele escribir como

$$\mathbf{F}_{\text{neto}} = m\mathbf{a}$$

La fuerza neta de un objeto es igual a su masa por su aceleración y apunta en la dirección de la aceleración.



(a) La aceleración de dos masas atraídas por resortes idénticos es la mitad de la magnitud que para una sola masa.

$$\leftarrow \text{aceleración} = \frac{\text{fuerza neta}}{\text{masa}}$$

$$\leftarrow \text{fuerza neta} = \text{masa} \times \text{aceleración}$$

$\leftarrow$  segunda ley de Newton

La segunda ley describe una relación específica entre tres cantidades: fuerza neta, masa y aceleración. Aunque tenemos una prescripción para determinar el valor numérico de una aceleración, todavía no hemos hecho esto para las otras dos cantidades. Debemos tomar una decisión. Podemos elegir un resorte normal estirado una cantidad específica como nuestra definición de 1 unidad de fuerza, o podemos tomar cierta cantidad de materia y definirla como 1 unidad de masa, o podemos incluso seleccionar las dos unidades de manera independiente.

Históricamente, se ha elegido cierta cantidad de materia como masa estándar. Se le asignó el valor de 1 **kilogramo** (kg). Un litro de agua (un poco más que un cuarto de galón) tiene una masa de 1 kilogramo. A partir de eso, el valor de la unidad de fuerza se define en términos de la aceleración observada de esta masa

estándar. La fuerza necesaria para acelerar un kilogramo de masa 1 (metro por segundo) por segundo se llama 1 **newton** (N), en honor de Isaac Newton. La fuerza gravitacional de una manzana muy pequeña es aproximadamente 1 newton.

En Estados Unidos, una unidad de fuerza de uso común es la *libra* (lb). La unidad de masa, un *slug*, se emplea en tan raras ocasiones que es posible que nunca haya oído hablar de ella. Una libra es la fuerza requerida para acelerar una masa de 1 slug 1 (10 por segundo) por segundo.

Una vez más hemos encontrado una pauta en la naturaleza. Podemos usar la segunda ley de Newton para predecir el movimiento de los objetos antes de realmente hacer el experimento.



### SOLUCIÓN | La segunda ley

¿Cuál es la fuerza neta necesaria para acelerar  $3 \text{ m/s}^2$  un objeto de  $5 \text{ kg}$ ? Al aplicar la segunda ley, tenemos

$$F_{\text{net}} = ma (5 \text{ kg})(3 \text{ m/s}^2) = 15 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2 = 15 \text{ N}$$

Al utilizar cualquier regla de la naturaleza, debemos usar un conjunto coherente de unidades. Las unidades son una parte integral de las reglas de la naturaleza. En el caso anterior, cuando las aceleraciones se miden en (metros por segundo) por segundo, las masas deben estar en kilogramos y las fuerzas en newtons. La combinación  $\text{kg} \cdot \text{m/s}^2$  es igual a un newton.

**Pregunta** Suponga que en esta situación usted descubrió que existe una fuerza de  $5 \text{ N}$  de fricción opuesta al movimiento. ¿Qué tan grande es la fuerza aplicada que actúa sobre el objeto?

**Respuesta** La fuerza neta es la suma de vectores de la fuerza aplicada y la fuerza friccional. Para obtener una fuerza neta de  $15 \text{ N}$ , la fuerza aplicada debe ser  $20 \text{ N}$ . Es decir,  $20 \text{ N}$  en dirección de avance más  $5 \text{ N}$  en reversa produce una suma de  $15 \text{ N}$  en dirección de avance.

Podemos usar la segunda ley para formular otras preguntas. Por ejemplo, ¿qué aceleración produciría una fuerza neta de  $2 \text{ N}$  que actúa sobre el objeto de  $5 \text{ kg}$ ? Al reorganizar la segunda ley e incorporar los valores de masa y fuerza, obtenemos

$$a = \frac{F_{\text{net}}}{m} = \frac{2 \text{ N}}{5 \text{ kg}} = \frac{2 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2}{5 \text{ kg}} = 0.4 \text{ m/s}^2$$

**Pregunta** Una caja cae de un helicóptero y aterriza en un montón de nieve. La nieve frena la caja y termina por detenerla. Durante el tiempo que la caja desciende por la nieve, ¿la magnitud de la fuerza hacia arriba que la nieve ejerce sobre la caja es mayor que, igual a, o menor que la magnitud de la fuerza gravitacional que actúa hacia abajo sobre la caja?

**Respuesta** Debido a que la caja se mueve hacia abajo, su velocidad apunta hacia abajo. Como la caja pierde velocidad, su aceleración debe apuntar en la dirección opuesta; es decir, hacia arriba. La fuerza neta siempre apunta en la misma dirección que la aceleración. Por lo tanto, la fuerza que actúa hacia arriba sobre la caja debe ser mayor que la fuerza que actúa hacia abajo. Por lo tanto, la nieve ejerce la mayor fuerza.

## Masa y peso

A menudo se confunde la masa con el peso. Una parte de la confusión estriba en el hecho de que la masa y el peso son proporcionales entre sí; la duplicación del valor de una duplica el valor del otro. Además, en nuestra experiencia cotidiana no se aprecian las diferencias. Sin embargo, en la visión del mundo de la física las diferencias son profundas y, por lo tanto, importantes para comprender el movimiento.

Medimos nuestro **peso** por la cantidad que podemos comprimir un resorte calibrado, como el de una báscula de baño. Comprimos el resorte porque la Tierra nos atrae; somos atraídos hacia abajo. Nuestro peso depende de la fuerza de esta atracción gravitacional. Si estuviéramos en la Luna, nuestro peso sería menor porque la fuerza gravitacional de la Luna sobre nosotros sería menor.

Sin embargo, nuestra masa *no* depende de nuestra ubicación en el universo. Es una propiedad constante que sólo depende de cuánto hay de nosotros. Si estuviéramos lejos, muy lejos de cualquier planeta u otro cuerpo celeste, podríamos carecer de peso, pero no de masa. Y, debido a que tenemos masa, la fuerza requerida para acelerarnos todavía se obtiene mediante la segunda ley de Newton.

La idea de ingravidez fascina a los escritores de ciencia ficción. No obstante, algunos de ellos confunden los conceptos de masa y peso. Al contrario de algunos relatos de ingravidez, las leyes del movimiento todavía se aplican en estas situaciones. Por ejemplo, suponga que en un lugar lejano en el espacio, en donde se pueden dejar de considerar todas las fuerzas gravitacionales, usted flota en su nave espacial, y choca contra una pared. Usted sólo rebota, sin sentir dolor. La pared aporta una fuerza para frenarlo e invertir su movimiento. La segunda ley de Newton nos dice que esta fuerza depende sólo de su masa y de la aceleración que experimente, las cuales son iguales aquí en la Tierra. Si la fuerza puede romper huesos en la Tierra, puede hacer lo mismo en la nave espacial. No tener peso no significa que usted no tengan masa. Asimismo, imagine un camión enorme en el espacio exterior “colgado” de una báscula de resortes. Aunque la báscula leyera cero, si usted intenta patear el camión, encontraría que se niega a moverse.

El mercado es otro lugar donde suelen confundir la masa y el peso. Decimos que vamos a comprar “una libra de mantequilla”. Una libra es una unidad de peso y se determina mediante cuánta mantequilla estira un resorte en la báscula. Es una medida de la atracción gravitacional y varía ligeramente de un lugar a otro. Al comprador en realidad no le importa el peso de la mantequilla, sino le interesa comprar cierta cantidad de mantequilla; lo importante es su masa. Las tiendas que emplean básculas de resortes las calibran con masas estándar para compensar el valor de la atracción gravitacional local. En el resto del mundo, las unidades de las básculas de resortes normalmente son unidades de masa para reflejar el hecho de que usted compra cierta masa de producto.

Esta confusión entre masa y peso no se resuelve con un cambio al sistema métrico. Es probable que casi todas las personas todavía se refieran a la masa estándar como “peso” y al proceso de determinar la cantidad de mantequilla como “pesar”. Lo que realmente significa decir “la mantequilla pesa 1 kilogramo” es que la cantidad de mantequilla tiene un peso que es igual al peso de 1 kilogramo. Debido a que es realmente un bocado, es probable que las personas digan que el peso de la mantequilla es de 1 kilogramo.

Una masa de 1 kilogramo cerca de la superficie terrestre tiene un peso de 9.8 newtons, o aproximadamente 2.2 libras. Por lo tanto, una “libra” de mantequilla tiene un peso de 4.5 newtons y una masa un poco menor que  $\frac{1}{2}$  kilogramo. Cuando EUA cambie por completo al sistema métrico, lo más probable es que la mantequilla se compre por  $\frac{1}{2}$  kilogramo, como se hace actualmente en casi todo el mundo.

Aunque las diferencias entre masa y peso no son tan importantes en el mercado, el ejemplo de la nave espacial muestra que debemos ser cuidadosos al analizar estos conceptos en la física.



© Charles D. Winters

Los compradores emplean las básculas de los supermercados para determinar las masas de los productos.

## Peso

La fuerza que hace que un objeto acelere hacia la superficie terrestre es sólo la fuerza gravitacional. A menudo llamamos a esta fuerza el peso del objeto.

En la situación idealizada sin resistencia de aire descrita en el capítulo 2, concluimos que todos los objetos cerca de la superficie terrestre caen con una aceleración constante. Representemos esta aceleración debida a la gravedad con el símbolo  $\mathbf{g}$ , en donde hemos usado un vector para indicar la magnitud y la dirección. Si reemplazamos la fuerza neta  $\mathbf{F}_{\text{neta}}$  por el peso  $\mathbf{W}$  y la aceleración  $\mathbf{a}$  por la aceleración debida a la gravedad  $\mathbf{g}$  en la segunda ley de Newton, obtenemos

peso = masa  $\times$  aceleración debida  
a la gravedad  $\blacktriangleright$

$$\mathbf{W} = m\mathbf{g}$$

Esto es sólo un modo matemático para decir que el peso de un objeto es proporcional a su masa y que se dirige hacia abajo.

### SOLUCIÓN | Peso



Como ejemplo numérico, calculemos el peso de un niño con una masa de 25 kg:

$$W = mg = (25 \text{ kg})(10 \text{ m/s}^2) = 250 \text{ N}$$

Por lo tanto, el niño tiene un peso de 250 N (alrededor de 55 lb).

**Pregunta** ¿Cuál es el peso de un luchador que tiene una masa de 120 kg?

**Respuesta** 1200 N.

Este proceso se puede invertir para obtener la masa de un perro que tiene un peso de 150 N:

$$m = \frac{W}{g} = \frac{150 \text{ N}}{10 \text{ m/s}^2} = 15 \text{ kg}$$

## Diagramas de cuerpo libre



Imagine que jala a su hermanita en un trineo que acelera. Muchas fuerzas actúan sobre el trineo. La cuerda ejerce una tensión sobre el trineo y lo atrae hacia adelante. La Tierra empuja el trineo hacia abajo con una fuerza gravitacional. La nieve impulsa el trineo hacia arriba con lo que se conoce como *fuerza normal*. (*Normal* significa perpendicular y esta fuerza actúa perpendicular a la superficie entre el trineo y la nieve.) Su hermana empuja hacia abajo el trineo con una fuerza normal, y la nieve resiste sus esfuerzos con una fuerza friccional que actúa paralela a la superficie de la nieve.

¿Cuál de estas fuerzas usamos en la segunda ley de Newton para hallar la aceleración del trineo? ¿La fuerza de la cuerda? ¿La fuerza más grande? No. La fuerza neta. La fuerza neta es la suma de vectores de todas las fuerzas que actúan *sobre el trineo*. Por lo tanto, es importante identificar correctamente *todas* las fuerzas que actúan sobre un objeto al analizar su movimiento.

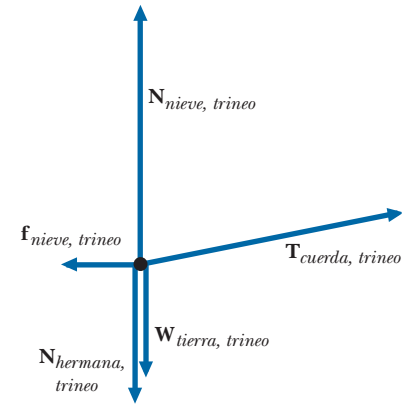
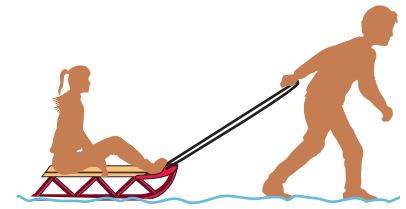
Identificamos las fuerzas al dibujar un *diagrama de cuerpo libre*. Como lo sugiere su nombre, aislamos, o liberamos, el objeto en cuestión (en este caso, el trineo) de todo lo demás. Representamos el objeto mediante un punto. Después dibujamos todas las fuerzas que actúan sobre el objeto, cada una a partir del punto. Nombramos cada vector para indicar el tipo de fuerza que representa:  $\mathbf{W}$  para una fuerza gravitacional,  $\mathbf{N}$  para una fuerza normal,  $\mathbf{f}$  para una fuerza friccional y  $\mathbf{T}$  para una fuerza de tensión (una atracción ejercida mediante una cuerda). Debido a que cada fuerza es una interacción entre dos objetos (cosas que usted puede tocar, gus-

tar y oler), también es útil incluir dos subíndices para cada nombre de fuerza, uno para indicar cuál objeto ejerce la fuerza y el segundo para indicar sobre cuál objeto se actúa. Por ejemplo, la fuerza de tensión que ejerce la cuerda sobre el trineo se llamaría  $T_{\text{cuerda, trineo}}$ . Si no es capaz de identificar el objeto que ejerce una fuerza, debe considerar la posibilidad de que la fuerza no exista.

Prepare un diagrama de cuerpo libre para el trineo descrito. Cuando termine, compare su diagrama con la figura 3-10. Todos los segundos subíndices deben ser “trineo”, porque sólo las fuerzas que actúan sobre el trineo aparecen en este diagrama de cuerpo libre.

Recuerde que su diagrama debe coincidir con la aceleración del trineo. Sabemos que el trineo acelera. Esto significa que la aceleración del trineo debe apuntar en la misma dirección que su velocidad. Si el trineo se mueve hacia la derecha y acelera, la aceleración también debe apuntar a la derecha. Si la aceleración es hacia la derecha, la suma de las fuerzas que actúan hacia la derecha debe ser más grande que la suma de las fuerzas que actúan hacia la izquierda. Debido a que el trineo no acelera hacia arriba o hacia abajo, la suma de las fuerzas que actúan hacia arriba debe equilibrar la suma de las fuerzas que actúan hacia abajo.

El dibujo de un diagrama de cuerpo libre siempre debe ser el primer paso para resolver un problema relacionado con la segunda ley de Newton. El tiempo requerido para dibujar el diagrama rara vez se desperdicia, porque casi todos los problemas reales son demasiado complicados para responder correctamente sin dibujar primero un diagrama. Recordemos la historia del leñador que derribaba un árbol. Un observador pregunta, “¿cuánto tiempo has aserrado ese árbol?” y recibe la respuesta “¡Casi tres horas!”. El observador vuelve a preguntar “¿Por qué tardas tanto tiempo?” y le contestan “Mi sierra no tiene filo”. “¿Por qué no afilas tu sierra?” replica el paseante. “Estoy demasiado ocupado aserrando este árbol.”



**Figura 3-10** El diagrama de cuerpo libre para el trineo.

## Razonamiento defectuoso



Usted analiza un problema en el cual dos fuerzas actúan horizontalmente sobre un objeto. Una fuerza de 20 newtons jala hacia la derecha y una fuerza de 5 newtons jala hacia la izquierda. Un compañero afirma que la fuerza neta son 20 newtons porque la que actúa es la fuerza dominante. **¿Qué tiene de incorrecto esta afirmación?**

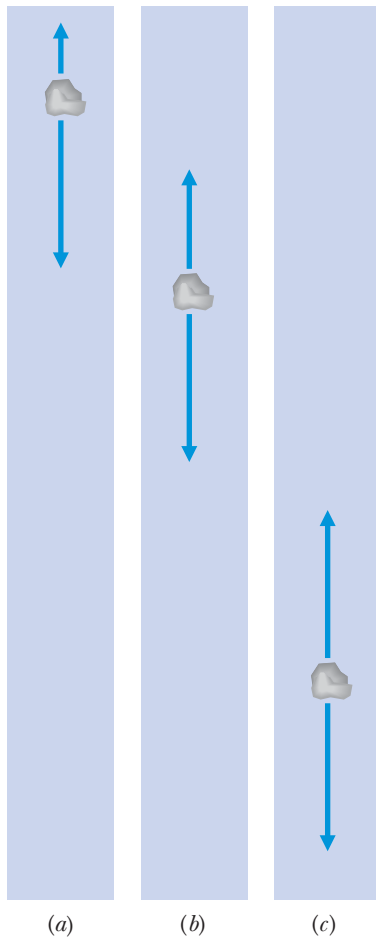
**Respuesta** La fuerza neta es la suma de vectores de todas las fuerzas que actúan sobre el objeto. En este caso, 15 newtons jalan más a la derecha que hacia la izquierda. Por lo tanto, la fuerza neta sería 15 newtons a la derecha.

## Revisión de caída libre

Los objetos atraídos por la Tierra no caen en un vacío, sino a través del aire, el cual ofrece una fuerza resistente al movimiento. Por lo tanto, en situaciones realistas, dos fuerzas actúan al mismo tiempo sobre un objeto que cae: el peso que actúa hacia abajo y la resistencia del aire que actúa hacia arriba. Entre otros factores, la fuerza de la resistencia del aire depende de la rapidez del objeto. Entre mayor es la rapidez, mayor es la resistencia del aire. Puede sentir esto al pegar su mano a la ventanilla de un automóvil mientras aumenta la velocidad.

Con estos hechos en mente, considere el movimiento hacia abajo de una roca que cae. Al principio, tiene una rapidez lenta, y la resistencia del aire es poca. Existe una fuerza neta hacia abajo igual al peso de la roca, menos la fuerza de la resistencia del aire (figura 3-11[a]). Debido a que hay una fuerza neta, la roca acelera, lo cual aumenta su rapidez. Sin embargo, incluso con esto, su peso permanece constante y al mismo tiempo aumenta la resistencia del aire (figura 3-11[b]). Por lo tanto, la fuerza neta y la aceleración disminuyen. La roca sigue acelerando, pero a un ritmo menor. En algún momento, la roca alcanza una velocidad para la cual la resistencia





**Figura 3-11** Conforme aumenta la rapidez de una roca que cae (a) y (b), aumenta la fuerza de la resistencia del aire, hasta que es igual (c) al peso de la roca.

del aire es igual al peso (figura 3-11[c]). Ya no actúa una fuerza neta sobre la roca, y deja de acelerar: su rapidez permanece constante. Esta rapidez máxima se llama la **rapidez terminal** del objeto.

La rapidez terminal de objetos diferentes no necesariamente es igual. Incluso si son idénticos la forma y el tamaño de dos objetos —con lo cual tienen fuerzas friccionales idénticas— los objetos tienen una rapidez terminal diferente si poseen masas distintas. Aunque, en todos los casos, el objeto sigue acelerando hasta que su fuerza friccional es igual que su peso. El valor de la rapidez terminal se determina mediante una combinación de muchos factores: el tamaño, la forma y el peso del objeto, al igual que las propiedades del medio. Un teléfono celular tiene una rapidez terminal mucho mayor que una pluma, principalmente porque la forma de la pluma crea una fuerza resistente que rápidamente se equipara a su peso.

Analícemos de nuevo los paracaidistas mencionados en el capítulo anterior. Al suponer que no había resistencia del aire, calculamos que los paracaidistas caerían con una rapidez de 1080 kilómetros por hora (675 mph) después de sólo 30 segundos. Tal como saben los paracaidistas, la velocidad máxima que pueden obtener cerca del nivel del mar es un poco más de 300 kilómetros por hora (190 mph). Es obvio que la resistencia del aire es responsable de esta diferencia. Los paracaidistas también saben que su rapidez terminal se puede alterar al cambiar su forma —si juntan sus pies o extienden sus extremidades— porque entre más grande es la superficie del objeto que enfrenta el viento, mayor es la resistencia del aire.

## Galileo contra Aristóteles

Recuerde que en el capítulo 2 analizamos las visiones de Aristóteles y Galileo sobre el tema de los objetos que caen, y apoyamos con firmeza las ideas de Galileo. ¡Ahora parece que estamos de acuerdo con Aristóteles! Si un objeto que cae alcanza una rapidez terminal cuyo valor es determinado por el peso del objeto y su interacción con el medio, ¿no tenía razón Aristóteles? Puede ser.

El movimiento de una bola de boliche dejada caer desde gran altura demuestra que cada uno describió correctamente una parte del movimiento de la bola. Al principio, antes que la resistencia del aire se volviera significativa, la bola exhibe una aceleración constante, tal como imaginó Galileo. Conforme aumenta la resistencia del aire, la aceleración ya no es constante, sino disminuye a cero. A partir de ese punto, el objeto se desplaza con una rapidez permanente, tal como lo describe Aristóteles.

Cada uno describió extremos diferentes del movimiento: Galileo, el extremo en el cual no se considera la resistencia del aire; Aristóteles, el extremo de la máxima resistencia del aire. Con un poco de ingenuidad, se podría sugerir que determináramos cuánto del movimiento es acelerado y cuánto es a una velocidad constante. Después podríamos entregar un premio a la persona cuya explicación se mantuviera durante más tiempo. Ganaría Aristóteles; sólo necesitamos dejar caer el objeto desde posiciones cada vez más altas, con lo cual la parte de la rapidez constante de la caída se hace tan duradera como se quiera.

Pero la creación de una visión del mundo a partir de la física no siempre avanza al elegir con dichas bases. Galileo se ha desempeñado mejor a los ojos de los historiadores de la ciencia porque su idealización descartó lo que no es esencial del movimiento de caída y, por lo tanto, descubrió el comportamiento más fundamental del movimiento. De ese modo, Galileo abrió el camino para el trabajo de Newton, el cual explica todo el movimiento de un objeto en caída libre (incluyendo las observaciones de Aristóteles). Siempre y cuando se conozcan todas las fuerzas que actúan sobre un objeto, se puede calcular la aceleración resultante.

## Fricción



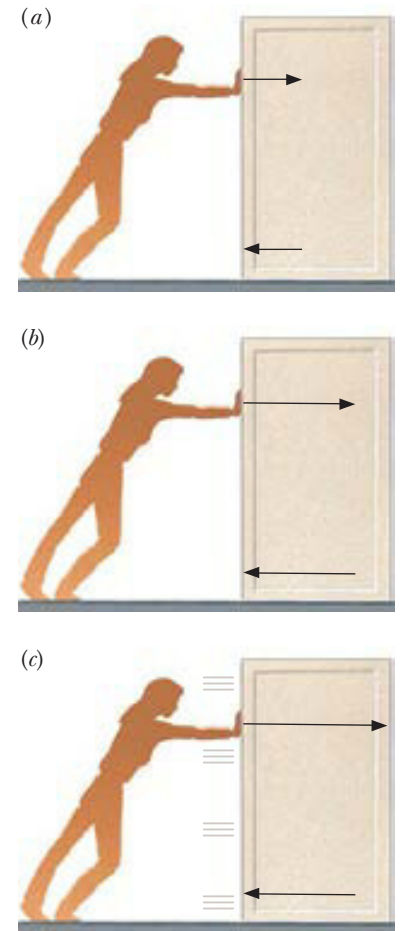
La idea de Newton se puede voltear; en lugar de predecir el movimiento a partir de las fuerzas, podemos utilizar el movimiento de un objeto para que nos diga algo acerca de las fuerzas que actúan sobre él. Imagine que empuja en forma horizontal una caja de madera grande (figura 3-12[a]). Al principio, usted no empuja con fuerza suficiente para mover la caja. Si no se mueve, no hay aceleración y, según la

segunda ley de Newton, no puede haber una fuerza neta sobre la caja. Esto significa que cuando menos debe haber una fuerza que cancele el impulso. Esta otra fuerza es la fricción que el piso ejerce sobre la caja. Mientras la caja no se mueva, la fuerza friccional debe tener la misma magnitud y la dirección opuesta a la fuerza aplicada. Esta se denomina **fricción estática**, para diferenciarla de la fuerza friccional que ocurre cuando se mueve la caja.

Esta fuerza friccional estática parece un poco misteriosa. Debido a que es igual a la fuerza que usted ejerce, la fuerza friccional es pequeña si usted impulsa con una fuerza pequeña. Pero si impulsa con una fuerza grande, la fuerza friccional es grande (figura 3-12[b]). Se opone a la fuerza aplicada y deja de existir cuando se elimina la fuerza aplicada. La fuerza friccional estática puede tener cualquier valor desde cero hasta un valor máximo determinado por las superficies y el peso de la caja. Observe que el comportamiento de la fuerza friccional estática es muy similar a la fuerza que ejerce un resorte.

Si su fuerza aplicada supera la fuerza friccional estática máxima, la caja acelera en la dirección de su fuerza aplicada. Aunque ahora la caja se desliza, todavía hay una fuerza friccional (figura 3-12[c]). El valor de esta **fricción cinética** es menor que el valor máximo de la fuerza friccional estática. A diferencia de la resistencia del aire, la *fricción cinética tiene un valor constante, independiente de la velocidad del objeto.*

Es importante comprender la diferencia entre la fricción estática y la fricción cinética al efectuar un paro de emergencia en un automóvil. Debido a que se quiere detener el vehículo lo más rápido posible, necesita tener la fuerza friccional máxima con el camino. Esto ocurre cuando los neumáticos giran porque su superficie no se desliza sobre la superficie del camino, y lo importante es la fricción estática mayor. Por lo tanto, usted no debe frenar con tanta fuerza que se deslicen los neumáticos. Ocurre lo mismo cuando un automóvil dobla una esquina demasiado rápido. Una vez que los neumáticos comienzan a deslizarse, se reduce la fuerza friccional, lo que dificulta recuperarse del deslizamiento. Si alguna vez ha estado en alguna de estas desafortunadas situaciones, es posible que recuerde lo rápido que se desliza el vehículo una vez que empieza a derrapar.



**Figura 3-12** La fuerza friccional estática es igual y opuesta a la fuerza aplicada si la caja no acelera. La fuerza aplicada puede ser pequeña (a), o grande (b), siempre y cuando no se mueva la caja. La fuerza friccional cinética (c) tiene un valor constante independiente de la rapidez.

### FÍSICA | HÁGALO USTED MISMO

Con un sencillo bloque de madera y una liga elástica grande, puede verificar el comportamiento de la fricción estática y cinética. Conecte la liga al bloque con una chincheta y jale lentamente el bloque. El estiramiento de la liga ofrece un indicio visual de la fuerza que aplica. Si el bloque no se mueve, la fuerza estática es igual pero opuesta en dirección a la fuerza de la liga. Jale cada vez más la liga. ¿Qué ocurre?

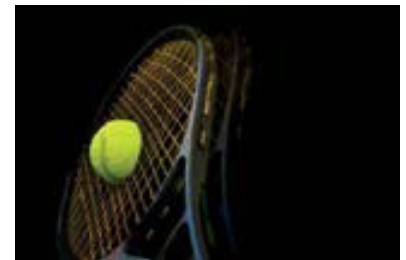
Repita el experimento, con el bloque de cristal deslizándose sobre la mesa con una rapidez constante. ¿Cómo se compara ahora el estiramiento de la liga con su estiramiento máximo en la situación estática?

Un avance importante en la industria automotriz se basa en el hecho de que la fricción estática es mayor que la fricción cinética. Los frenos antibloqueo son un sistema de frenado controlado por computadora que evita que las ruedas se derrapen, lo cual maximiza las fuerzas friccionales. Unos sensores vigilan la rapidez con que giran las ruedas y transmiten sin cesar información a la computadora a bordo. La computadora controla el frenado al aplicar presión y soltar repetidamente las pastillas del freno. Sin un frenado antibloqueo, un conductor que pisa el freno, con la esperanza de evitar el peligro, hace que las ruedas se bloqueen, lo cual suele provocar una pérdida de control y un aumento en la distancia de detención.

## Tercera ley de Newton



Todavía falta por considerar otra ley newtoniana. Imagine que juega tenis y acaba de golpear una pelota. La raqueta ejerce una fuerza sobre la pelota que hace que se acelere. La fotografía de alta velocidad de la figura 3-13 muestra que las cuerdas



**Figura 3-13** Una fotografía de alta velocidad ejemplifica la tercera ley de Newton. La pelota ejerce una fuerza sobre las cuerdas, y las cuerdas ejercen una fuerza igual y opuesta sobre la pelota.

## Velocidades terminales



Los esquiadores adquieren velocidad al reducir su resistencia al aire y la resistencia de los esquís con la nieve.

La rapidez con que algo se mueve depende de las fuerzas que retardan su movimiento, al igual que aquellas que lo impulsan hacia adelante. Las principales fuerzas retardantes son las fuerzas friccionales, que suelen provenir del medio por el que se mueve el objeto. Una carrera de 100 sobre 3 pies de agua produciría tiempos mucho más lentos que el récord actual de 9.77 segundos en el aire. Pero incluso en el aire, existe una resistencia al movimiento. Es posible medir el aumento

en el kilometraje de la gasolina de un automóvil limpio y encendido sobre un vehículo sucio.

Cuando las fuerzas retardantes igualan a las fuerzas propulsoras, no hay una fuerza neta sobre el objeto, el cual deja de acelerar: alcanza una rapidez constante conocida como rapidez terminal. La reducción de las fuerzas retardantes aumenta la rapidez terminal.

La aerodinamización de un objeto minimiza la resistencia del aire. En 1980, Steve McKinney estableció el récord mundial de rapidez terrestre sin propulsión al prestar mucha atención a la reducción de la resistencia del aire y la fricción. Esquió por una pendiente de 40 grados a poco más de 200 kilómetros por hora (¡125 mph!). El actual récord de descenso por una colina lo tiene Phillippe Goitschel a 251 kilómetros por hora (156 mph). El récord femenino lo tiene Karine Dubouchet con 242 kilómetros por hora (151 mph). El halcón peregrino, ya aerodinamizado, desciende por sus presas a velocidades hasta de 350 kilómetros por hora.

El efecto de minimizar la resistencia del aire fue convincentemente comprobado por Joseph Kittinger, capitán de la Fuerza Aérea de EUA, cuando saltó de un globo a 31 330 metros y obtuvo una rapidez de más de 1006 kilómetros por hora (625 mph) después de caer aproximadamente 4000 metros. ¡A esta velocidad casi rompe la barrera del sonido! Después fue frenado lentamente cuando la atmósfera se volvió más densa.

de la raqueta de tenis son empujadas al mismo tiempo que la pelota se aplana. La pelota es aplastada por la fuerza de la raqueta *sobre la pelota*; al mismo tiempo, la fuerza de la pelota *sobre la raqueta* estira las cuerdas de la raqueta. En el mismo momento que la raqueta ejerce una fuerza sobre la pelota, la pelota ejerce una fuerza opuesta sobre la raqueta.

Si usted pretende ahondar más en este punto, pida ayuda a un amigo con un experimento sencillo. Dé a su amigo un empujón. Al mismo tiempo que usted lo empuja, sentirá una fuerza ejercida sobre usted, sin considerar si su amigo resiste el empujón. Si es posible, intente esto mientras utiliza patines de hielo o patines en línea; el efecto será todavía más perceptible.

Llevemos esto un paso más allá. Apóyese en una pared. Perciba la fuerza de la pared que empuja su espalda. Si esta fuerza no existiera, usted caería.

Experimentos de este tipo pudieron haber conducido a Newton a su tercera ley del movimiento. Comprendió que no hay manera de impulsar algo sin ser impulsado uno mismo. Para cada fuerza existe una fuerza igual y opuesta. Las dos fuerzas actúan sobre objetos diferentes, son de la misma magnitud, y actúan en direcciones opuestas. Formalmente, declaramos así la **tercera ley del movimiento de Newton**:

Tercera ley de Newton ➤

Si un objeto ejerce una fuerza sobre un segundo objeto, el segundo objeto devuelve una fuerza igual sobre el primer objeto.

Debido a que Newton se refería a estas fuerzas como acción y reacción, se conoce como par acción–reacción. Sin embargo, debido a que las dos fuerzas son equivalentes, no importa cuál es la acción y cuál la reacción. Otra declaración de la tercera ley podría ser que para cada acción existe una reacción igual y opuesta.

Las fuerzas siempre ocurren en pares. En palabras de Newton, “Si usted oprime una piedra con su dedo, la piedra también presiona el dedo”. Estas fuerzas *nunca*

actúan sobre el mismo cuerpo. Cuando usted oprime la piedra con su dedo, ejerce una fuerza sobre la piedra. La fuerza de reacción actúa sobre usted.

Considere una pelota con un peso de 10 newtons que cae libremente hacia la superficie terrestre. Ignorando la resistencia del aire, sólo una fuerza actúa sobre la pelota; la gravedad terrestre la atrae hacia abajo con una fuerza de 10 newtons. ¿Cuál es la segunda fuerza en el par acción-reacción? La primera es la fuerza de la Tierra que actúa sobre la pelota y puede denominarse  $\mathbf{W}_{eb}$  (en donde los subíndices *eb* nos recuerdan que esta es la fuerza de la Tierra sobre la pelota). La segunda fuerza implica los objetos en el orden inverso y se escribe  $\mathbf{W}_{be}$  para *pelota sobre la Tierra* (figura 3-14). Por lo tanto, la tercera ley de Newton nos dice que la pelota debe ejercer una fuerza hacia arriba sobre la Tierra de 10 newtons. Aunque su sentido común puede decirle que la Tierra debe ejercer una fuerza más grande porque es mucho más grande, esto no es cierto. Sin importar cuál es el origen de las fuerzas, la tercera ley de Newton dice que las fuerzas deben ser iguales en magnitud y opuestas en dirección.

Pero si esto es cierto, ¿por qué la Tierra no acelera hacia la pelota? Lo hace, pero si ponemos los valores dentro de la segunda ley de Newton, encontramos que la masa de la Tierra es tan grande que su aceleración es minúscula. La Tierra acelera, pero no nos damos cuenta.

Un punto muy importante en relación con las fuerzas de la tercera ley es que una de las fuerzas actúa sobre la pelota, mientras la otra actúa sobre la Tierra; una hace que la pelota acelere, y la otra hace que la Tierra acelere. Debido a que las dos fuerzas actúan sobre objetos diferentes, las fuerzas no pueden cancelarse; si estas son las únicas fuerzas que actúan, ambos objetos aceleran. Las fuerzas de la tercera ley *nunca* aparecen en el mismo diagrama de cuerpo libre.

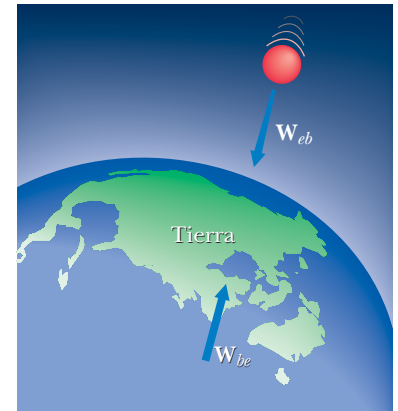
Sin la tercera ley, ocurrirían eventos paradójicos en la visión del mundo newtoniana. Por ejemplo, considere por qué una persona no cae por el suelo. Existe una fuerza gravitacional que atrae a la persona hacia abajo. Si ésta fuera la única fuerza que actuara sobre la persona, de acuerdo con la segunda ley de Newton, la persona aceleraría hacia abajo a través del suelo. Debido a que la persona no acelera, la fuerza neta sobre la persona debe ser cero. Por lo tanto, surge la pregunta, “¿Cuál es la fuerza que compensa la fuerza gravitacional hacia abajo?”.

La tercera ley de Newton ofrece la respuesta. La Tierra atrae a la persona con una fuerza que podemos llamar  $\mathbf{W}_{ep}$ , igual que en la figura 3-15. La persona empuja hacia abajo sobre el suelo con una fuerza que llamamos  $\mathbf{N}_{pf}$ . Según la tercera ley, el piso empuja hacia arriba sobre la persona con una fuerza  $\mathbf{N}_{fp}$  cuya magnitud es igual y cuya dirección es opuesta a  $\mathbf{N}_{pf}$ . Por lo tanto, dos fuerzas actúan sobre la persona: el peso  $\mathbf{W}_{ep}$  de la persona y la fuerza hacia arriba  $\mathbf{N}_{fp}$  del piso. Aunque estas dos fuerzas son iguales en magnitud y actúan en direcciones opuestas, no son las fuerzas de la tercera ley; ambas actúan sobre la persona. Son iguales y opuestas porque la persona no acelera; por lo tanto, según la segunda ley de Newton, la fuerza neta sobre la persona debe ser cero. Observe que la fuerza de la tercera ley asociada con el peso  $\mathbf{W}_{ep}$  de la persona es la fuerza gravitacional de la persona que actúa sobre la Tierra  $\mathbf{W}_{pe}$ .

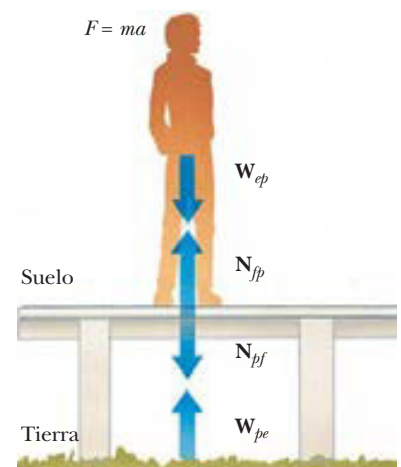
**Pregunta** Una rama ejerce una fuerza hacia arriba sobre una manzana en un árbol. ¿Cuál es la compañera de la tercera ley para esta fuerza?

**Respuesta** Es la fuerza hacia abajo de la manzana en la rama. Observe que no es la fuerza hacia abajo de la gravedad sobre la manzana. Aunque la fuerza gravitacional es igual y opuesta a la fuerza hacia arriba sobre la manzana, ambas fuerzas actúan sobre la manzana y no pueden ser fuerzas de acción-reacción.

Cuando usted dispara un rifle, recula. ¿Por qué? Según lo explica la tercera ley, cuando el rifle ejerce una fuerza hacia adelante sobre la bala (en virtud de una explosión), al mismo tiempo la bala ejerce una fuerza igual sobre el rifle, pero hacia atrás. Pero, ¿por qué el rifle no acelera tanto como la bala? La fuerza del rifle sobre la bala produce una aceleración grande porque la masa de la bala es pequeña. La



**Figura 3-14** La Tierra ejerce una fuerza  $\mathbf{W}_{eb}$  sobre la pelota. Según la tercera ley de Newton, la pelota ejerce una fuerza igual y opuesta  $\mathbf{W}_{be}$  sobre la Tierra.



**Figura 3-15** La Tierra ejerce una fuerza  $\mathbf{W}_{ep}$  sobre la persona, lo cual hace que la persona ejerza una fuerza  $\mathbf{N}_{pf}$  sobre el suelo. Según la tercera ley de Newton, el suelo ejerce una fuerza  $\mathbf{N}_{fp}$  igual y opuesta sobre la persona. Aunque  $\mathbf{W}_{ep}$  y  $\mathbf{N}_{fp}$  son iguales y opuestas, no son un par acción-reacción; ambas actúan sobre la persona.



**Figura 3-16** Cuando un hombre camina hacia la izquierda, ejerce una fuerza sobre el bote que hace que éste se mueva a la derecha.



fuerza de la bala sobre el rifle es de la misma magnitud, pero produce una aceleración pequeña porque la masa del rifle es grande.

Hasta el acto sencillo de caminar sólo es posible debido a las fuerzas de la tercera ley. Al caminar debe conseguir que se ejerza sobre usted una fuerza en la dirección de su aceleración. Sin embargo, la fuerza que usted produce claramente ocurre en la dirección opuesta. La solución para esta aparente paradoja yace en la tercera ley. Cuando usted comienza a caminar, ejerce una fuerza contra el suelo (hacia abajo y hacia atrás); por lo tanto, el suelo ejerce una fuerza contraria, lo cual provoca que usted vaya hacia delante (y un poco hacia arriba). Si hay un poco de arena o tierra suelta donde usted camina, puede ver que la impulsa *hacia atrás*. Si busca una demostración más clara de que usted impulsa hacia atrás contra el suelo, intente avanzar sobre una patineta o en un bote de remos (figura 3-16). ¡Pero tenga cuidado!

### FÍSICA | HÁGALO USTED MISMO

Determine su peso en una báscula de baño colocada dentro de un elevador cuando éste se detiene, cuando acelera hacia arriba, cuando viaja entre los pisos con una rapidez constante, y cuando se detiene. ¿Qué espera usted que ocurra? Explique su razonamiento en cada caso.

### Razonamiento defectuoso



Pensemos de nuevo en la caja que cayó del helicóptero en un montón de nieve grande. Tres estudiantes discuten cuál fuerza es mayor, la fuerza ejercida por la nieve hacia arriba sobre la parte inferior de la caja o la fuerza ejercida hacia abajo por la parte inferior de la caja sobre la nieve.

**Jennifer:** “La caja debe impulsar hacia abajo sobre la nieve más de lo que la nieve impulsa hacia arriba sobre la caja porque la caja todavía desciende por la nieve.”

**Mónica:** “La nieve debe impulsar hacia arriba sobre la caja con más fuerza de la que la caja impulsa hacia abajo sobre la nieve porque la caja se frena.”

**Peter:** “Las dos fuerzas, la caja sobre la nieve y la nieve sobre la caja, son parte de la misma interacción. Siempre deben ser iguales en magnitud y opuestas en dirección según la tercera ley de Newton.”

**¿Con cuál estudiante coincide usted?**

**Respuesta** Las fuerzas de la tercera ley siempre implican a los mismos participantes. Si A impulsa sobre B, en tal caso B devuelve el impulso sobre A. Cuando nos referimos a las dos fuerzas como la caja sobre la nieve y la nieve sobre la caja, se vuelve obvio que son fuerzas de la tercera ley. Siempre deben ser iguales en magnitud y opuestas en dirección.



## Resumen

De acuerdo con la primera ley del movimiento de Newton, un objeto en reposo debe permanecer en reposo, y un objeto en movimiento permanece en movimiento con una velocidad constante, a menos que una fuerza externa neta actúe sobre el objeto. La fuerza neta se determina al sumar todas las fuerzas que actúan sobre un objeto, de acuerdo con las reglas para combinar cantidades de vector. También es cierto lo opuesto de la primera ley de Newton: si un objeto tiene una velocidad constante (incluyendo el caso de velocidad cero), la fuerza desequilibrante, o neta, que actúa sobre el objeto debe ser cero.

Si existe una fuerza neta, el objeto acelera con un valor determinado por la segunda ley del movimiento de Newton,  $\mathbf{a} = \mathbf{F}_{\text{net}}/m$ . La dirección de la aceleración siempre es la misma que la de la fuerza neta. En el sistema métrico, la unidad de masa es el kilogramo y la unidad de fuerza es el newton.

La segunda ley del movimiento de Newton sirve para estudiar las fuerzas friccionales. La fricción estática puede ir de cero a un valor máximo que depende de la fuerza que impulsa las superficies entre sí y la naturaleza de estas superficies. La fricción cinética tiene un valor constante menor que el valor estático máximo. Un tipo especial de fricción es la resistencia del aire, la cual varía con la rapidez del objeto. Cuando la resistencia del aire que actúa sobre un objeto que cae se vuelve igual al peso del objeto, la aceleración llega a cero, y el objeto cae con su rapidez terminal.

El peso de un objeto cerca de la superficie terrestre se obtiene mediante  $\mathbf{W} = m\mathbf{g}$ , en donde  $\mathbf{g}$  es la aceleración debida a la gravedad, aproximadamente 10 (metros por segundo) por segundo hacia abajo. El peso, una fuerza, no debe confundirse con la masa.

Las fuerzas no existen aisladas. Todas las fuerzas ocurren en pares con la misma magnitud y direcciones opuestas. Mientras usted está de pie, ejerce una fuerza hacia abajo *sobre el suelo*. Según la tercera ley de Newton, el suelo debe ejercer *sobre usted* una fuerza hacia arriba de la misma magnitud. Estas dos fuerzas no se cancelan porque actúan sobre objetos diferentes: una sobre usted y una sobre el suelo. La otra fuerza que actúa sobre usted es la gravedad.

## Capítulo 3



## Revisión

La aceleración de un objeto en caída libre se vuelve cada vez menor porque la fuerza debida a la resistencia del aire aumenta al mismo tiempo que la rapidez del objeto, y su magnitud cada vez se acerca más a la fuerza gravitacional que atrae el objeto hacia abajo. Por lo tanto, la fuerza neta disminuye de manera continua. Cuando la fuerza neta, o total, se vuelve cero, la aceleración también se vuelve cero y la rapidez asume un valor constante. Esta rapidez se conoce como rapidez terminal.

## TÉRMINOS IMPORTANTES

**fricción cinética:** La fuerza friccional entre dos superficies en movimiento relativo. Esta fuerza no depende mucho de la rapidez relativa.

**fricción estática:** La fuerza friccional entre dos superficies en reposo relacionadas entre sí. Esta fuerza es igual y opuesta a la fuerza aplicada neta si la fuerza no es lo bastante grande para hacer que acelere el objeto.

**fuerza:** Un impulso o una atracción. Se calcula con la aceleración que produce sobre un objeto común aislado,  $\mathbf{F}_{\text{net}} = m\mathbf{a}$ . Se mide en newtons.

**inercia:** La resistencia de un objeto a un cambio en su velocidad.

**inversamente proporcional:** Una relación en la cual dos cantidades tienen un producto constante. Si una cantidad aumenta por un factor específico, la otra disminuye por el mismo factor.

**kilogramo:** La unidad de masa del sistema internacional (SI) estándar. Un kilogramo de material pesa alrededor de 2.2 libras en la Tierra.

**ley de la inercia:** La primera ley del movimiento de Newton.

**masa:** Una medida de la cantidad de materia en un objeto. La masa determina la inercia de un objeto. Se mide en kilogramos.

**movimiento, primera ley de Newton del:** La velocidad de un objeto permanece constante a menos que una fuerza desequilibrante actúe sobre el objeto.

**movimiento, segunda ley de Newton del:**  $F_{\text{neta}} = ma$ . La fuerza neta sobre un objeto es igual a su masa por su aceleración. La fuerza neta y la aceleración son vectores que siempre apuntan en la misma dirección.

**movimiento, tercera ley de Newton del:** Si un objeto ejerce una fuerza sobre un segundo objeto, el segundo objeto ejerce una fuerza igual sobre el primer objeto.

**newton:** La unidad de fuerza del SI. Una fuerza de 1 newton acelera una masa de 1 kilogramo con una rapidez de 1 (metro por segundo) por segundo.

**peso:**  $W = mg$ . La fuerza de la atracción gravitacional de la Tierra para un objeto.

**proporcional:** Una relación en la cual dos cantidades tienen una relación constante. Si una cantidad aumenta por cierto factor, la otra aumenta por el mismo factor.

**rapidez terminal:** La rapidez obtenida en caída libre cuando la fuerza hacia arriba de la resistencia del aire es igual a la fuerza hacia abajo de la gravedad.

## PREGUNTAS CONCEPTUALES

- Suponga que deja caer una bolsa de bocadillos mientras viaja en un avión que vuela hacia el oeste a 800 kilómetros por hora. ¿La bolsa caerá directo hacia abajo, o en un ángulo hacia el frente o hacia atrás del avión? Explique su razonamiento.
- La habitación en la que usted se encuentra en este momento se mueve aproximadamente 400 m por segundo como resultado de la rotación de la Tierra sobre su eje. Las paredes de la habitación están sujetas a la tierra pero, si sus llaves se salen de su bolsillo, no lo están. ¿Por qué *no* parece que las llaves vuelan hacia la pared oeste?
- Suponga que empuja un carrito por un estacionamiento nivelado. Cuando usted deja de empujar, el carrito se detiene. ¿Esto viola la primera ley de Newton? ¿Por qué?
- Si da un empujón a este libro para que se mueva sobre una mesa, se frena y se detiene. ¿Cómo concilia esta observación con la primera ley de Newton?
- ¿Cómo se compara la fuerza neta sobre el primer carro del metro con la del último carro, si el metro tiene una velocidad constante?
- ¿Qué puede decir sobre las fuerzas que actúan sobre una motocicleta que viaja con una rapidez constante por un tramo recto de carretera?
- ¿Por qué una borla que cuelga del espejo retrovisor parece avanzar cuando usted frena?
- Cuando los perros terminan de nadar, suelen sacudirse para secarse. ¿Cuál es la física detrás de esto?
- Suponga que no utiliza cinturón de seguridad y su automóvil se detiene de repente. ¿Por qué su cabeza puede chocar con el parabrisas?
- Es obligatorio que los automóviles modernos tengan reposacabezas para proteger su cuello durante los choques. ¿Para cuál tipo de choque son más eficaces estos reposacabezas?

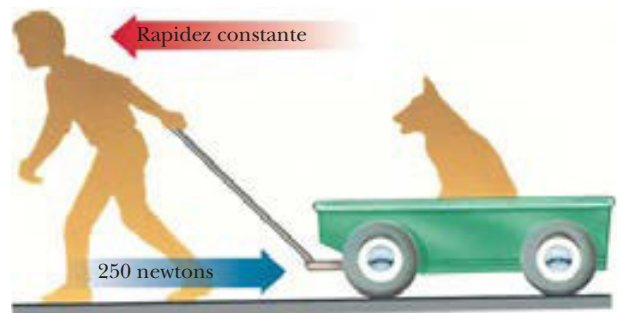
- ¿Por qué un herrero utiliza un yunque al martillar una herradura?



© Dale A. Stork/Shutterstock

- Observe que cada vez que golpea un filete sobre el mostrador de su cocina, se caen los envases del especiero colgado en la pared. Para resolver el problema, compra una tabla de corte grande de madera, que utiliza sobre el mostrador bajo el filete. ¿Por qué esto es útil?
- En lenguaje cotidiano, *inercia* significa que algo es difícil de cambiar. ¿Es éste el único significado que tiene en la física? De lo contrario, ¿cuáles otros significados tiene?
- ¿Cómo determinaría si dos objetos tienen la misma inercia?
- Cuando varias fuerzas diferentes actúan sobre un objeto, ¿la fuerza neta necesariamente está en la misma dirección que una de las fuerzas individuales? ¿Por qué?

16. Usted analiza un problema en el cual dos fuerzas actúan sobre un objeto. Una fuerza de 200 newtons atrae hacia la derecha, y una fuerza de 40 newtons atrae hacia la izquierda. Un compañero afirma que la fuerza neta son 200 newtons porque actúa la fuerza dominante. ¿Qué tiene de incorrecta esta aseveración?
17. Fuerzas de 40 newtons y 90 newtons actúan sobre un objeto. ¿Cuáles son los valores mínimo y máximo para la suma de estas dos fuerzas?
18. Se utilizan dos cuerdas para sacar un automóvil de una zanja. Cada cuerda ejerce una fuerza de 700 newtons sobre el auto. ¿Es posible que la suma de estas dos fuerzas tenga una magnitud de 1000 newtons? Explique su razonamiento.
19. Usted aplica una fuerza de 75 newtons para jalar el carro de un niño sobre el suelo con una rapidez constante. Si aumenta la fuerza a 80 newtons, ¿el carro acelerará hasta una nueva velocidad constante o seguirá acelerando indefinidamente? Explique su razonamiento.
20. Usted empuja una caja llena de libros sobre el suelo con una rapidez constante de 0.5 metros por segundo. Después quita algunos libros y empuja exactamente igual que lo hizo antes. ¿En qué es diferente el movimiento de la caja, si ese es el caso?
21. Si la fuerza neta sobre una embarcación se dirige al este, ¿cuál es la dirección de la aceleración de la embarcación? ¿Cambiaría su respuesta si el bote tuviera una velocidad hacia el norte pero la fuerza neta todavía actuara hacia el este?
22. Si la fuerza neta sobre un globo de aire caliente se dirige verticalmente hacia arriba, ¿cuál es la dirección de la aceleración del globo? ¿Cuál sería la dirección de la aceleración si el globo viajara hacia el oeste (mientras la fuerza neta todavía actuara verticalmente hacia arriba)?
23. Usted viaja en un elevador de un departamento del 10o. piso al estacionamiento en el sótano. Cuando se acerca al estacionamiento, el elevador comienza a frenar. ¿Cuál es la dirección de la fuerza neta sobre usted?
24. Usted viaja en un elevador del estacionamiento en el sótano a un departamento del 10o. piso. Cuando se acerca al departamento, el elevador comienza a frenar. ¿Cuál es la dirección de la fuerza neta sobre usted?
25. Si usted duplica la fuerza neta horizontal aplicada a un carro, ¿qué ocurre a la aceleración del carro?
26. ¿Qué ocurre a la aceleración de un cohete si la fuerza neta que actúa sobre él se reduce a la mitad?
27. Un automóvil puede acelerar a 2 (metros por segundo) por segundo cuando remolca un automóvil idéntico. ¿Cuál será su aceleración si se rompe la cadena de remolque?
28. ¿Cómo se compara la fuerza neta sobre el primer carro del metro con la del último carro, si el metro tiene una aceleración constante? Suponga que los carros del metro son idénticos.
29. Cuando un astronauta camina sobre la Luna, ¿su masa o su peso es igual que en la Tierra? Explique.
30. Si compra una bolsa de galletas saladas con un contenido de 0.1 kg, ¿adquiere la masa o el peso de las galletas?
31. ¿Cómo se compara el peso de una lata de gaseosa con el peso de un paquete con seis de las mismas gaseosas?
32. ¿Qué ocurre con el peso de un objeto si usted lo lleva de la Tierra a la Luna, en donde la aceleración debida a la gravedad es un sexto de la Tierra?
33. Una esquiadora frena cuando esquía sobre un terreno nivelado. Dibuje un diagrama de cuerpo libre para la esquiadora.
34. Un automóvil en una sección nivelada de la carretera acelera para rebasar a un camión. Dibuje un diagrama de cuerpo libre para el automóvil.
35. ¿Bajo cuáles condiciones una pelota de golf y una pelota de tenis de mesa soltadas al mismo tiempo desde la misma altura llegan al suelo al mismo tiempo?
36. Si una pelota de golf y una pelota de tenis de mesa se sueltan al mismo tiempo desde la misma altura, no llegan al suelo al mismo tiempo. ¿Cómo explicaría Aristóteles esto? ¿Cómo lo haría Galileo?
37. Una canica soltada dentro de una botella con jabón líquido alcanza pronto una rapidez terminal. Dibuje un diagrama de cuerpo libre para la canica justo antes que choque con la parte inferior de la botella.
38. Dibuje un diagrama de cuerpo libre para un paracaidista que ha alcanzado una rapidez terminal. ¿Cuál es su aceleración?
39. Sara toma el elevador de alta velocidad, el cual viaja con una rapidez constante de 5 metros por segundo, al piso 43 de un edificio de gran altura. Sam hace el mismo viaje en el elevador de carga, que viaja con una rapidez constante de sólo 1.5 metros por segundo. Compare las fuerzas netas sobre Sara y Sam.
40. Pat y Chris empujan cajas idénticas sobre un piso rugoso. La caja de Pat se mueve a 1 metro por segundo constante mientras que la caja de Chris avanza a 2 metros por segundo constantes. Compare las fuerzas netas sobre las dos cajas.
41. Un amigo declara engañosamente que “La primera ley de Newton no funciona si hay fricción”. ¿Cómo corregiría usted esta afirmación?
42. Uno de sus compañeros expone en forma inexacta que “La segunda ley de Newton sólo funciona cuando no hay fuerzas friccionales”. ¿Cómo corregiría usted esta aseveración?
43. Usted aplica una fuerza de 400 newtons a un congelador lleno de helado con chipas de chocolate en un intento de moverlo a través del sótano. No se mueve. ¿La fuerza friccional que ejerce el piso sobre el congelador es mayor que, igual a, o menor que 400 newtons?
44. Se da cuenta que debe empujar con una fuerza de 10 newtons para que un envase de crema se siga deslizando con una rapidez constante sobre el mostrador de su baño. Con el envase en reposo, usted aplica una fuerza de 11 newtons. ¿Es posible que el envase se mantenga en reposo? Explique.
45. ¿Cuál fuerza se requiere para jalar un perro sobre un coche por una acera nivelada, igual que la figura, con una rapidez constante si la fuerza friccional es 250 newtons?



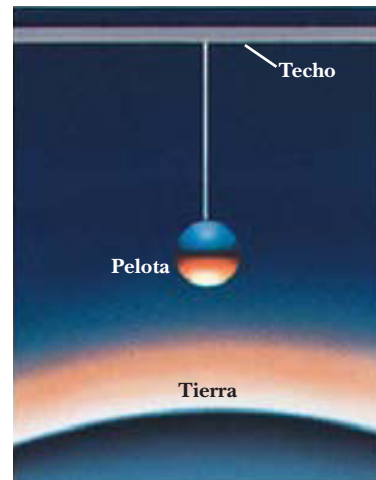
46. Un chico sobre una patineta viaja por una rampa empinada con una rapidez terminal constante. ¿Cuál es la magnitud y la dirección de la fuerza neta sobre el chico?
47. Usted conduce por la carretera a 75 mph cuando un insecto choca contra su parabrisas. Compare la fuerza del insecto sobre el parabrisas con la fuerza del parabrisas sobre el insecto.
48. Usted se lanza desde un puente con una cuerda de salto de caída libre atada a los tobillos. Conforme se acerca al río que está abajo, la cuerda comienza a estirarse y usted comienza a frenar. ¿Qué es mayor, la fuerza de la cuerda sobre sus tobillos para frenarlo o la fuerza de sus tobillos sobre la cuerda para estirla? Explique.
49. ¿La magnitud de la fuerza que ejerce el Sol sobre la Tierra es mayor, menor, o igual que la fuerza que la Tierra ejerce sobre el Sol? Explique su razonamiento.
50. Suponga que viaja sobre un carrusel. ¿Cómo se compara la fuerza que el carrusel ejerce sobre usted con la fuerza que usted ejerce sobre el carrusel? Explique su razonamiento.
51. ¿Cuál es la fuerza neta sobre una manzana que pesa 4 newtons cuando usted la mantiene en reposo?
52. Suponga que sostiene una manzana que pesa 4 newtons. ¿Cuál es la fuerza neta de la manzana justo después de que usted la deja caer?
53. ¿Por qué los cañones a bordo de las embarcaciones piratas ruedan hacia atrás cuando los disparan?
54. ¿Por qué una raqueta de tenis se frena cuando golpea una pelota?



© Thomas Hajek/Dreamstime

55. Describa la fuerza o fuerzas que le permite caminar por una habitación.

- ▲ 56. Solemos afirmar que el motor proporciona las fuerzas que impulsan un automóvil. Esta es una simplificación exagerada. ¿Cuáles fuerzas mueven realmente el vehículo?
57. Una pelota con un peso de 40 newtons viaja en caída libre hacia la superficie de la Luna. ¿Cuál fuerza ejerce la pelota sobre la Luna?
58. La figura exhibe una pelota que cuelga de una cuerda desde el techo. Identifique los pares acción-reacción del dibujo. Exponga que las magnitudes de todas las fuerzas son iguales.



- ▲ 59. Si la fuerza que ejerce un caballo sobre un carro es igual y opuesta a la fuerza que ejerce el carro sobre caballo, tal como lo exige la tercera ley de Newton, ¿cómo consigue el caballo mover el carro?
60. Gary lee sobre la tercera ley de Newton mientras está sentado en una habitación con una sola puerta cerrada. Razona que si aplica una fuerza sobre la puerta, habrá una fuerza igual y opuesta que cancelará su impulso y que nunca podrá salir. Se lamenta "¿Por qué me puse a estudiar física?". ¿Qué tiene de incorrecto el razonamiento de Gary?
61. Una lata de refresco está en reposo sobre una mesa. ¿Cuál de las leyes de Newton explica por qué la fuerza hacia arriba de la mesa que actúa sobre la lata es igual y opuesta a la fuerza gravitacional de la Tierra que empuja hacia abajo la lata?
62. Un ratón está en reposo sobre una base para ratón. ¿Cuál fuerza dice la tercera ley de Newton que es igual y opuesta a la fuerza gravitacional que actúa sobre el ratón?

## EJERCICIOS

1. Encuentre la magnitud de la fuerza neta producida por una fuerza de 6 N y una de 8 N en cada una de las situaciones siguientes:
  - a. Las fuerzas actúan en la misma dirección.
  - b. Las fuerzas actúan en direcciones opuestas.
  - c. Las fuerzas actúan en ángulos rectos entre sí.
2. Encuentre la magnitud de la fuerza neta producida por una fuerza de 5 N y una de 12 N en cada una de las situaciones siguientes:
  - a. Las fuerzas actúan en la misma dirección.
  - b. Las fuerzas actúan en direcciones opuestas.
  - c. Las fuerzas actúan en ángulos rectos entre sí.

3. Dos fuerzas horizontales actúan sobre un carro, 550 N hacia delante y 300 N hacia atrás. ¿Cuál fuerza se requiere para producir una fuerza neta de cero?
4. Tres fuerzas actúan sobre un objeto. Una fuerza de 4 N actúa en dirección este y una fuerza de 3 N actúa en dirección norte. Si la fuerza neta sobre el objeto es cero, ¿cuál es la magnitud de la tercera fuerza?
5. ¿Cuál es la aceleración de un búfalo de 600 kg si la fuerza neta sobre el búfalo son 1800 N?
6. ¿Cuál es la aceleración de un automóvil de 2000 kg si la fuerza neta sobre el vehículo son 4000 N?
7. Una bala 30-06 tiene una masa de 0.010 kg. Si la fuerza promedio sobre la bala son 9000 N, ¿cuál es la aceleración promedio de la bala?
8. La fuerza neta horizontal sobre un carro de ferrocarril de 60 000 kg son 6000 N. ¿Cuál es la aceleración del carro?
9. ¿Cuál fuerza neta se necesita para acelerar a un patinador sobre hielo de 60 kg a  $3 \text{ m/s}^2$ ?
10. Si un trineo con una masa de 20 kg va a acelerar a  $5 \text{ m/s}^2$ , ¿cuál fuerza neta se requiere?
11. Si una almádena de 6 kg tiene un peso de 10 N en la Luna, ¿cuál es su aceleración cuando se deja caer?
12. Un vendedor afirma que un automóvil de 1200 kg tiene una aceleración promedio de  $3 \text{ m/s}^2$  a partir de una referencia inicial a 100 km/h. ¿Qué fuerza neta promedio se requiere para hacer esto?
13. Si un paracaidista tiene una fuerza de 300 N y una aceleración de  $4 \text{ m/s}^2$ , ¿cuál es la masa del paracaidista?
14. Un niño en patines de ruedas experimenta una aceleración de  $0.4 \text{ m/s}^2$  debido a una fuerza neta horizontal de 24 N. ¿Cuál es la masa del niño?
15. Una pelota de 0.5 kg se lanza verticalmente hacia arriba. Si ignoramos la resistencia del aire, ¿cuáles son la dirección y la magnitud de cada fuerza que actúa sobre la pelota mientras viaja hacia arriba?
16. Una pelota de 1 kg se lanza recto hacia arriba en el aire. ¿Cuál es la fuerza neta que actúa sobre la pelota cuando alcanza su máxima altura? ¿Cuál es la aceleración de la pelota en este punto?
17. Skip Parsec, intrépido explorador espacial, viaja hacia un nuevo planeta y encuentra que sólo pesa 320 N. Si su masa son 80 kg, ¿cuál es la aceleración debida a la gravedad en este planeta?
18. Un astronauta totalmente equipado pesa 1500 N sobre la superficie terrestre. El astronauta tiene un peso de 555 N al pararse en la superficie de Marte, ¿cuál es la aceleración debida a la gravedad en Marte?
- ▲ 19. Una caja tiene una masa de 24 kg. ¿Cuál fuerza aplicada se requiere para producir una aceleración de  $3 \text{ m/s}^2$  si se sabe que la fuerza friccional son 90 N?
- ▲ 20. Se utiliza una cuerda para jalar un bloque de 10 kg sobre el suelo con una aceleración de  $3 \text{ m/s}^2$ . Si la fuerza friccional que actúa sobre el bloque son 50 N, ¿cuál es la tensión en la cuerda?
- ▲ 21. Si un tirón de 210 N acelera a un niño de 40 kg sobre patines de hielo a un ritmo de  $5 \text{ m/s}^2$ , ¿cuál es la fuerza friccional sobre los patines?
- ▲ 22. Si usted se para sobre una báscula de resortes en su baño, obtiene una lectura de 600 N, lo que significa que su masa son 60 kg. Si, en lugar de eso, se para sobre la báscula mientras acelera hacia arriba a  $2 \text{ m/s}^2$  en un elevador, ¿cuál sería la lectura, en newtons?
23. Terry y Chris jalan con ambas manos en direcciones opuestas los extremos de una cuerda, mientras están de pie sobre un estanque congelado sin fricción. La masa de Terry son 75 kg y la masa de Chris son 50 kg. Si la aceleración de Terry son  $2 \text{ m/s}^2$ , ¿cuál es la aceleración de Chris?
- ▲ 24. Una madre que tiene una masa de 50 kg y su hija con una masa de 25 kg patinan sobre hielo. Están frente a frente, y la madre empuja a la hija de un modo que su aceleración son  $2 \text{ m/s}^2$ . ¿Cuánta fuerza ejerce la madre sobre la hija? ¿Cuánta fuerza ejerce la hija sobre la madre? ¿Cuál es la aceleración de la madre?



# 4 Gravedad

Una conocida leyenda dice que Newton tuvo su idea más creativa mientras miraba caer al suelo una manzana. Realizó un inmenso salto conceptual al igualar el movimiento de la manzana con el movimiento de la Luna y desarrollar el concepto de gravedad. ¿Qué tan lejos llega la gravedad? ¿Observamos alguna evidencia de gravedad en otro lugar del universo?

---

(Consulte la respuesta a esta pregunta en la página 71.)

---

© NASA



*Esta vista de la Tierra saludó a los astronautas del Apolo 11 mientras orbitaban la Luna.*

**E**n la visión del mundo de un físico, existen cuatro fuerzas fundamentales: la gravitacional, la electromagnética, la débil y la fuerte. Comenzamos nuestro estudio de las fuerzas con la que estamos más familiarizados en nuestras vidas. Todos los niños en edad escolar saben que los objetos caen debido a la gravedad. Pero, ¿qué es la gravedad? Afirmar que es lo que hace caer las cosas no nos dice mucho.

¿La gravedad es un material como un fluido o la niebla? ¿O es algo más etéreo? Nadie lo sabe. Que hayamos asignado un nombre a algo no significa que lo comprendamos por completo. Entendemos la gravedad en el sentido de que podemos describir con precisión cómo afecta el movimiento de los objetos. Por ejemplo, ya hemos visto cómo utilizar el concepto de gravedad para describir el movimiento de los objetos que caen. Podemos hacer más. Al observar con atención los movimientos de ciertos objetos, podemos desarrollar una ecuación que describa esta fuerza de atracción entre los objetos materiales y explorar algunas de sus consecuencias.

Por otra parte, no podemos responder preguntas como “¿Qué es la gravedad?” o “¿Por qué existe la gravedad?”.

## El concepto de gravedad

El concepto de gravedad no ha existido siempre. Se concibió cuando los cambios en nuestra visión del mundo requirieron una nueva explicación de por qué las cosas caen en la Tierra. Cuando se creía que la Tierra era plana, no se necesitaba la gravedad. Los objetos caían porque buscaban sus lugares naturales. Una piedra en el extremo de una cuerda colgaba por su tendencia a regresar a su lugar natural. Arriba y abajo eran direcciones absolutas.

La comprensión de que la Tierra era esférica requirió un cambio de perspectiva. ¿Qué ocurría con esas desafortunadas personas en el otro lado de la Tierra que estaban de cabeza? Pero el cambio en el pensamiento se hizo sin la gravedad. El centro de la Tierra era el centro del universo, y las cosas se movían naturalmente hacia este punto. Arriba y abajo se volvieron relativos, pero la ubicación del centro del universo se hizo absoluta.

Tampoco se necesitaba la gravedad para comprender el movimiento de los cuerpos celestes. El esquema aceptado más antiguo explicaba que la Tierra era el centro del universo, y que cada uno de los cuerpos celestes rodeaba la Tierra en órbitas circulares. Las órbitas circulares perpetuas se consideraban naturales para los movimientos celestes; se prestaba poca atención a las causas de estos movimientos. Aristóteles no reconoció ninguna relación entre lo que percibía como perfecto, el movimiento celeste, e imperfecto, el movimiento terrestre. Declaró que el movimiento circular con rapidez constante era el más perfecto de todos los movimientos y, por lo tanto, que el movimiento celeste natural no necesitaba mayor explicación.

Esto cambió ligeramente con una nueva visión del movimiento celeste por Nicolás Copérnico, un científico y clérigo polaco del siglo XVI. Propuso que los planetas (entre ellos la Tierra) se desplazaban alrededor del Sol en órbitas circulares y que la Luna rodeaba la Tierra. En esencia, este es el esquema que se enseña en las escuelas en la actualidad. Un indicio de un concepto de la gravedad aparece en la obra de Copérnico. Pensaba que el Sol y la Luna atraerían a los objetos cercanos a sus superficies —cada uno tendría una gravedad local— pero no incluía el concepto de una influencia de atracción que se extendía por todo el espacio.

Cien años después, Johannes Kepler, un matemático y astrónomo alemán, sugirió que los planetas se movían debido a una interacción entre ellos y el Sol. Kepler también nos alejó de la suposición de que los planetas viajaban en trayectorias circulares. Después de muchos años de ensayo y error, Kepler dedujo correctamente que las órbitas de los planetas eran *elipses*; pero elipses que casi eran círculos. Además, los planetas no viajan con velocidades constantes por sus trayectorias elípticas, sino aceleran cuando se acercan al Sol y van más lentos cuando se alejan de él.

Influenciado por su importante trabajo inicial sobre el magnetismo, Kepler razonó que el Sol impulsaba magnéticamente los planetas a lo largo de sus trayec-

## KEPLER La música de las esferas

Johannes Kepler nació dos días después de Navidad en 1571. En su horóscopo, que después coleccionó, observó que la familia escribía su apellido de diferentes maneras, y que fue prematuro y enfermizo. El pueblo donde nació ahora es parte de Stuttgart, en el estado alemán de Baden-Württemberg. Su origen campesino no pudo encubrir su precocidad y destreza para las matemáticas. Fue elegido por el duque del lugar para recibir una buena educación y después asistido al nuevo seminario luterano en la Tübingen University. Ahí adquirió las técnicas necesarias para trabajar en avanzados problemas astronómicos.

La vida adulta de Kepler se centró en la astronomía matemática. Como luterano, pasó la mayor parte de su vida en Praga, bajo las órdenes de un emperador santo, católico y romano. Era un convencido copernicano y buscó ampliar la exactitud de esa nueva astronomía. Su primera obra —*Misterios cósmicos* (1597)— fue una teoría un tanto mística y numerológica que relacionaba las distancias y los tiempos de las revoluciones de los planetas. Su generación consideraba las matemáticas como un lenguaje que revelaba la armonía interior de la creación y que los movimientos celestiales revelaban la armonía física y la unidad en la acción. De modo que su búsqueda de la “música” de las esferas en realidad fue una búsqueda de una descripción matemática de la creación de dios.

Su mentor en astronomía, Tycho Brahe, fue un maestro dadas de la técnica y la precisión en las observaciones. De hecho, la obra de Brahe alcanzó el límite de las observaciones a simple vista. Después de fallecer Brahe, Kepler tuvo acceso a los cuantiosos informes astronómicos de los movimientos de Marte. Este planeta era el más sorprendente por sus movimientos aparentemente irregulares. Kepler publicó su libro sobre Marte en 1609 y lo hizo entrar a una era de la “nueva” astronomía. El libro contiene sus dos leyes del movimiento.



Johannes Kepler

© Nicku / Dreamstime

Su obra fue conocida en toda Europa, y él y Galileo (e incluso el padre de Galileo) cruzaron una engañosa correspondencia relacionada con problemas de astronomía. Una vez más, la música se analizó a menudo en este contexto.

Kepler se encontró a sí mismo sumergido en una serie de guerras europeas importantes, en la tragedia personal, y cuando su madre fue acusada de brujería en Baden-Württemberg, con la ley. Su gran capacidad siguió brillando durante toda esta agitación. Desarrolló una técnica —los logaritmos— para acelerar los cálculos, y continuó su trabajo astronómico. Necesitaba dinero con desesperación, de modo que redactaba predicciones astrológicas para los poderosos. Desarrolló el concepto de *satélite* e incluso escribió una breve fábula sobre un viaje espacial.

Siempre en la búsqueda de la armonía del cosmos, publicó en 1618 un libro similar al anterior sobre misterios cósmicos. En esta última obra, estableció su tercera ley, relacionadas con las órbitas planetarias, los tiempos de las revoluciones, y la teoría heliocéntrica. Fue sobre esta tercera ley sobre la cual Isaac Newton basó su obra con tanto éxito. De nuevo, surge un tema musical: se tituló *Armonías del mundo*.

Johannes Kepler dio impulso al descubrimiento de una nueva física, porque su astronomía destruyó las “Ruedas de la fortuna” de los círculos perfectos y las ideas acostumbradas de los movimientos naturales y antinaturales. Cuando murió, en 1630, su legado estaba asegurado. Había creado una nueva astronomía y demandado un nuevo concepto de la física para apoyarla.

—Pierce C. Mullen, historiador y autor

Fuentes: Max Caspar, *Kepler*, trad. y ed. C. Doris Hellman (Nueva York: Abelard-Schuman, 1959); Arthur Koestler, *The Watershed: A Biography of Johannes Kepler* (Garden City, N.Y.: Anchor Books, 1960).

torias. Debido a que esta obra ocurrió poco después de la aceptación de la idea de la inercia, Kepler no comprendió que se necesitaba una fuerza no para impulsar los planetas a lo largo de sus órbitas, sino para hacer que las órbitas fueran curvas. Kepler dedujo una interacción que iba del Sol a los diversos planetas y que los impulsaba, pero no consideró la posibilidad de cualquier interacción entre los planetas mismos; el Sol reinaba supremo, era una metáfora de su dios, de quien todos los demás obtenían fuerza.

Newton desarrolló nuestra actual visión de la gravedad. Comenzó por afirmar que las reglas de la naturaleza que él había desarrollado no se aplicaban de manera especial a la Tierra. También debían aplicarse a los movimientos celestes. La aceleración debe ser hacia el centro del círculo y, por lo tanto, una fuerza neta debe actuar sobre el objeto. Newton siguió buscando esta fuerza.

### Gravedad de Newton

La creatividad a menudo implica integrar ideas o cosas de áreas aparentemente no relacionadas. Después que un artista o un erudito lo ha hecho, la relación suele parecer más obvia a los demás. Newton hizo tal síntesis entre los movimientos en la Tierra y los movimientos en los cielos. La leyenda dice que hizo su salto intelectual mientras contemplaba los cielos y veía caer una manzana. La transición de



una manzana ligada a la Tierra que llega a las órbitas celestes ofrece una analogía del salto intelectual de Newton.

Newton creía que las leyes del movimiento que funcionaban en la superficie terrestre también se debían aplicar al movimiento en los cielos. Debido a que la Luna rodea la Tierra en una órbita casi circular, debe acelerar hacia la Tierra. Según la segunda ley, cualquier aceleración requiere una fuerza. Él creía que si esta fuerza pudiera cancelarse, la Luna ya no seguiría moviéndose por su trayectoria circular, sino que se alejaría en una línea recta, como una piedra arrojada con una honda.

El genio de Newton fue relacionar la causa de este movimiento celeste con los eventos terrenales. Newton sentía que la aceleración de la Luna se debía a la fuerza de gravedad; la misma gravedad que hacía que la manzana cayera del árbol. ¿Cómo podía demostrar esto? Primero, calculó la aceleración de la Luna. Debido a que ya se conocían la distancia a la Luna y el tiempo que tarda ésta en girar sobre sí misma, fue capaz de calcular que la Luna aceleraba 0.00272 (metros por segundo) por segundo. Esta es una aceleración muy pequeña. En 1 segundo, la Luna se mueve aproximadamente 1 kilómetro a lo largo de su órbita, pero sólo cae 1.4 milímetros (aproximadamente  $\frac{1}{20}$  pulgada en 0.6 millas).

En contraste con la aceleración de la Luna, la manzana tiene una aceleración de 9.80 (metros por segundo) por segundo y cae alrededor de 5 metros en su primer segundo de vuelo. (En análisis anteriores, redondeamos la aceleración a 10 (metros por segundo) por segundo para facilitar el cálculo. Esa pequeña diferencia es importante aquí.) Podemos comparar estas dos aceleraciones al dividir una entre la otra:

$$\frac{0.00272 \text{ m/s}^2}{9.80 \text{ m/s}^2} = \frac{1}{3600}$$

¿Por qué son tan diferentes estas dos aceleraciones? Por supuesto que la masa de la Luna es mucho más grande que la de la manzana. Pero eso no importa. Como vimos en el capítulo 2, todos los objetos en caída libre tienen la misma aceleración, independiente de sus masas.

Sin embargo, las aceleraciones de una manzana y la Luna no eran iguales. ¿Podía ser errónea la idea de Newton de que ambos movimientos estaban gobernados por la misma gravedad? O, ¿podían las reglas del movimiento que desarrolló en la Tierra no aplicarse al movimiento celeste? Negativo en ambos casos. Newton razonó que la aceleración de la Luna es menor debido a que la atracción gravitacional de la Tierra es menor en distancias más grandes; se “diluye” con la distancia.

¿Cómo disminuyó la fuerza con un aumento en la distancia? Es imposible rastrear el razonamiento de Newton porque no escribió acerca de cómo llegó a sus conclusiones, pero pudo haber aplicado el tipo de razonamiento siguiente.

Muchas cosas se vuelven menos intensas entre más lejos está usted de su origen. Imagine una pistola para pintar que puede atomizar pintura de manera uniforme en todas direcciones. Suponga que la pistola está en el centro de una esfera con un radio de 1 metro, y que al final de 1 minuto de atomización, la pintura en la pared interior de la esfera tiene 1 milímetro de grosor. Si repetimos el experimento con la misma pistola, pero con una esfera que tiene 2 metros de radio, la pintura sólo tendrá un grosor de  $\frac{1}{4}$  milímetro porque una esfera con el doble de radio tiene una superficie cuatro veces mayor que la original (figura 4-1). Si la esfera tiene el triple de radio, la superficie es nueve veces mayor, y la pintura tiene un grosor de  $(\frac{1}{3})^2 = \frac{1}{9}$ . El grosor de la pintura disminuye conforme aumenta el cuadrado del radio de la esfera. Esto se conoce como una relación **cuadrada inversa**. Una fuerza que llega al espacio se diluye de manera similar.



© Catalin Petrelea/Shutterstock

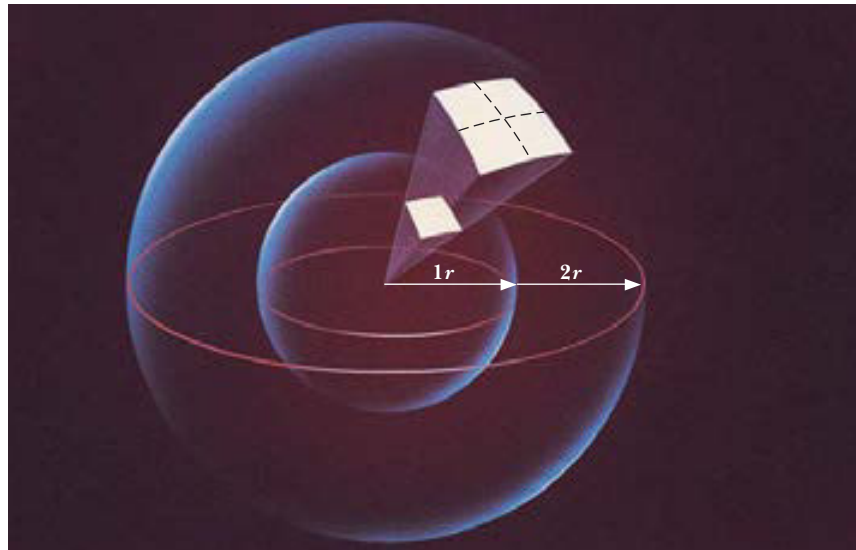
Dice la leyenda que Newton concibió su ley de la gravitación universal mientras observaba caer una manzana en su patio.

←  $\frac{\text{aceleración de la Luna}}{\text{aceleración de la manzana}}$

**Pregunta** Si la esfera tuviera un radio de 4 metros, ¿cuál sería el grosor de la pintura?

**Respuesta** Sería de  $(\frac{1}{4})^2 \times 1 \text{ milímetro} = \frac{1}{16} \text{ milímetro de grosor}$ .

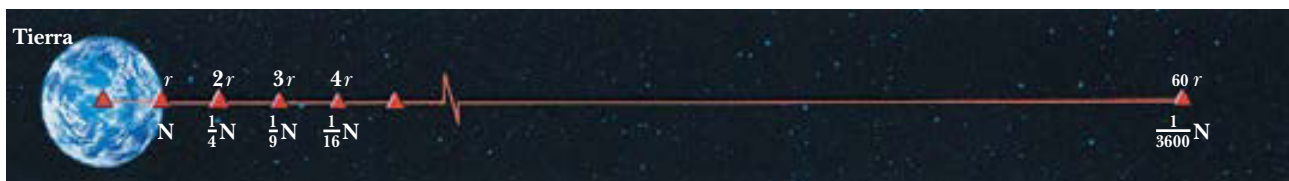
**Figura 4-1** Si se duplica el radio de la esfera, la superficie de ésta aumenta por un factor de cuatro.



Newton también pudo haberse entusiasmado por esta explicación porque trabajó hacia atrás a partir de resultados de observaciones del movimiento de los planetas desarrolladas por Kepler. Kepler encontró una relación que conectaba los periodos orbitales de los planetas con sus distancias promedio al Sol. Con los resultados de Kepler y una expresión para la aceleración de un objeto en el movimiento circular, podemos demostrar que la fuerza disminuye con el cuadrado de la distancia. Esto significa que si se duplica la distancia entre los objetos, se tiene sólo una cuarta parte de su fuerza. Si se triplica la distancia, se tiene un noveno de la fuerza que en la distancia original. Y así sucesivamente. Esta relación se presenta en la figura 4-2.

Exactamente, ¿qué significa la afirmación de que la fuerza tiene un noveno que en la distancia original? No podemos atribuirlo a las fuerzas gravitacionales que actúan sobre objetos diferentes; es obvio que la fuerza gravitacional sobre un automóvil es mucho más grande que la fuerza gravitacional sobre una persona. Debemos comparar la fuerza gravitacional que actúa sobre un solo objeto, como nuestra manzana, a distancias diferentes. Cuando la manzana se aleja tres veces del centro de la Tierra, la fuerza gravitacional sobre la manzana tiene un noveno que en la distancia original.

La prueba obvia de la noción de la gravedad fue apreciar si la relación entre la distancia y la fuerza producía las aceleraciones relativas correctas para la manzana en la Tierra y en la Luna que orbita. Newton pudo aplicar esta regla y hacer la comparación. La distancia del centro de la Tierra al centro de la Luna es de alrededor de 60 veces el radio de la Tierra. Por lo tanto, la Luna está 60 veces más lejos del centro de la Tierra que la manzana. De modo que la fuerza—y su aceleración— en la posición de la Luna debe ser  $60^2$ , o 3600 veces más pequeña. Esto coincide con el cálculo anterior. Los datos disponibles en la época de Newton no eran tan buenos como los que hemos utilizado aquí, pero su calidad era suficiente para convencerlo de la validez de su razonamiento. Las medidas modernas producen valores más precisos y coinciden con que *la fuerza gravitacional es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia*.



**Figura 4-2** La fuerza de una masa de 0.1 kilogramo a diversas distancias de la Tierra. Observe que la fuerza disminuye con el cuadrado de la distancia.



**Pregunta** ¿Qué le ocurre a la fuerza de gravedad si la distancia entre los objetos se reduce a la mitad?

**Respuesta** La fuerza se vuelve cuatro veces más fuerte.

Entonces Newton comprendió que la gravedad cambiaba con la distancia: la fuerza de gravedad de la Tierra existe más allá de la Tierra y se debilita conforme se aleja. Pero existen otros factores. Él ya sabía que la fuerza de la gravedad dependía de la masa del objeto. Su tercera ley del movimiento decía que la fuerza que ejercía la Tierra sobre la Luna tenía la misma fuerza que la que ejercía la Luna sobre la Tierra; se atraían entre sí. Esta simetría indicaba que ambas masas debían incluirse de la misma manera. *La fuerza gravitacional es proporcional a cada masa.*

## La ley de la gravitación universal

### ✓ MATEMÁTICAS

Una vez establecida la conexión entre el movimiento celeste y el movimiento cerca de la superficie terrestre con una fuerza que se extiende a través del espacio vacío y atrae los objetos a la Tierra, Newton dio otro paso, todavía más atrevido. Declaró que la fuerza de la gravedad existía entre *todos* los objetos, que era en realidad una ley de la gravitación *universal*.

La osadía de esta afirmación se vuelve evidente cuando uno comprende que la fuerza entre dos objetos de tamaño normal es sumamente pequeña. Es evidente que mientras usted camina junto a un amigo, no siente una atracción gravitacional que los una. Pero esto es exactamente lo que afirmaba Newton. Cualesquiera dos objetos tienen una fuerza de atracción entre ellos; su regla para la gravedad es una **ley de la gravitación universal**.

Al integrar todo, llegamos a una ecuación para la fuerza gravitacional:

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

en donde  $m_1$  y  $m_2$  son las masas de los dos objetos,  $r$  es la distancia entre sus centros, y  $G$  es una constante que contiene información acerca de la intensidad de la fuerza.

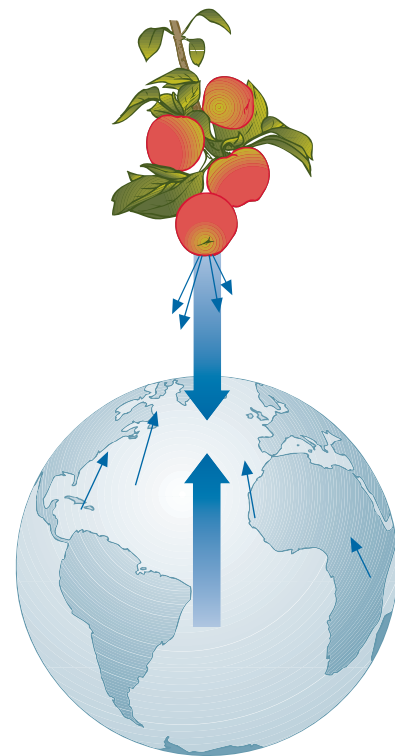
Aunque Newton llegó a esta conclusión cuando tenía 24 años de edad, no publicó sus resultados durante más de 20 años. En parte, esto se debió a un aspecto inquietante de su obra. La distancia que aparece en la relación es la distancia desde el centro de la Tierra. Esto significa que se supone que la masa de la Tierra se concentra en un punto en su centro. Esto puede parecer una suposición razonable al considerar la fuerza de gravedad de la Luna; el tamaño de la Tierra es irrelevante cuando se manejan estas enormes distancias. Pero, ¿qué sucede con la manzana en la superficie de la Tierra? En este caso, una masa que está sólo a algunos metros de distancia y una masa que está a 13 000 kilómetros de distancia atraen la manzana, al igual que toda la masa intermedia (figura 4-3). Parece menos intuitivo que todo esto de algún modo actuara como una masa muy compacta ubicada en el centro de la Tierra. Pero eso es justo lo que ocurre. En algún momento Newton fue capaz de demostrar matemáticamente que la suma de las fuerzas debidas a cada metro cúbico de la Tierra era igual que si todas ellas se concentraran en su centro.

Este resultado se sostiene si la Tierra es esféricamente simétrica. No debe tener una composición uniforme; sólo necesita estar compuesta por una serie de capas esféricas, cada una de las cuales tiene una composición uniforme. De hecho, 1 metro cúbico de material cerca del centro de la Tierra tiene casi cuatro veces la masa de un metro cúbico de material normal en la superficie.

Newton aplicó ampliamente las leyes del movimiento y la ley de la gravitación universal para explicar los movimientos de los cuerpos celestes. Fue capaz de demostrar que las tres leyes de la observación desarrolladas por Kepler para describir el movimiento planetario eran una consecuencia matemática de su obra. Las reglas de Kepler fueron el resultado de años de trabajo para reducir la información de las observaciones a un conjunto de pautas sencillas.

✓ El suplemento *Problem Solving* (Solución de problemas) ofrece una presentación extendida.

### ◀ ley de la gravitación universal



**Figura 4-3** La suma de todas las fuerzas sobre la manzana que ejercen todas las partes de la Tierra actúan como si toda la masa estuviera en el centro de la Tierra.

Para el siglo XVIII, los científicos confiaban tanto en la obra de Newton que cuando un planeta recién descubierto no se comportó “adecuadamente”, supusieron que debían existir otras masas, todavía por descubrir, que provocaban las desviaciones. Cuando se descubrió Urano en 1781, se hizo un gran esfuerzo para reunir datos adicionales acerca de su órbita. Al recurrir a registros antiguos, se determinaron tiempos y ubicaciones adicionales de su obra. Aunque la principal contribución a la órbita de Urano en la fuerza del Sol, los otros planetas también afectan a Urano. No obstante, en este caso los cálculos todavía diferían de la trayectoria real por una cantidad mínima. Las desviaciones fueron explicadas en términos de la influencia de un planeta desconocido. Esto condujo al descubrimiento de Neptuno en 1846.

Esto todavía no consideraba por completo las órbitas de Urano y Neptuno; comenzó la búsqueda por un planeta más. El descubrimiento de Plutón en 1930 todavía dejó algunas discrepancias. Aunque continúa la búsqueda de planetas nuevos, el análisis de la trayectoria de los planetas conocidos indica que cualquier planeta adicional debe ser muy pequeño o muy lejano o ambas cosas.

## El concepto de $G$

Aunque Newton tenía una ecuación para la fuerza gravitacional, no podía usarla para calcular en realidad la fuerza entre los objetos; necesitaba conocer el valor de la constante  $G$ . El modo de obtener esto era medir la fuerza entre dos masas conocidas separadas por una distancia conocida. Sin embargo, la fuerza entre los objetos sobre la Tierra es tan infinitesimal que no podía ser detectada en la época de Newton.

Transcurrieron más de 100 años después de la publicación de los resultados de Newton antes que Henry Cavendish, un científico británico, desarrollara una técnica lo bastante sensible para medir la fuerza entre dos masas. Las mediciones modernas producen el valor

constante gravitacional ►

$$G = 0.000\,000\,000\,066\,7 \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{kg}^2} = 6.67 \times 10^{-11} \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{kg}^2}$$

(Consulte en el cuadro “Solución” del capítulo 1 una explicación de esta notación.) La incorporación de este valor en la ecuación para la fuerza gravitacional nos indica que la fuerza entre dos masas de 1 kg separadas por un metro es de sólo 0.000 000 000 066 7 newtons. Esto es minúsculo comparado con un peso de 9.8 newtons para cada masa. El minúsculo valor de  $G$  explica por qué dos amigos no sienten su atracción gravitacional mutua cuando están uno cerca del otro.

Cavendish describió su experimento como “pesar” la Tierra, aunque hubiera sido más exacto afirmar que “concentró la masa” de la Tierra. No obstante, su explicación fue importante. Al medir el valor de  $G$ , Cavendish por primera vez permitió determinar con exactitud la masa de la Tierra. La aceleración de una masa cerca de la superficie terrestre depende del valor de  $G$  y de la masa y el radio de la Tierra. Debido a que sabía todos los valores, excepto la masa de la Tierra, pudo calcularla. La masa de la Tierra es  $5.98 \times 10^{24}$  kilogramos; eso es aproximadamente cuatrillones de veces más grande que la masa de usted.

Una vez conocida la masa de la Tierra, podemos utilizar la ley de la gravitación universal para calcular la aceleración debida a la gravedad cerca de la superficie terrestre:

$$g = \frac{F}{m} = \frac{GM_E}{R_E^2}$$

en donde  $M_E$  es la masa de la Tierra, y  $R_E = 6370$  kilómetros es el radio de la Tierra. La incorporación de los valores numéricos produce  $g = 9.8$  (metros por segundo) por segundo, tal como se esperaba.

Debido a que la Tierra orbita al Sol, con los resultados de Cavendish también puede calcularse la masa del Sol. Al hacer estos cálculos, se supone que el valor de  $G$  medido en la Tierra es válido en todo el sistema solar. Esto no puede mostrarse. Por otra parte, no existe evidencia de lo contrario, y esta suposición produce resultados coherentes. Newton hizo esta misma afirmación más de 100 años antes.

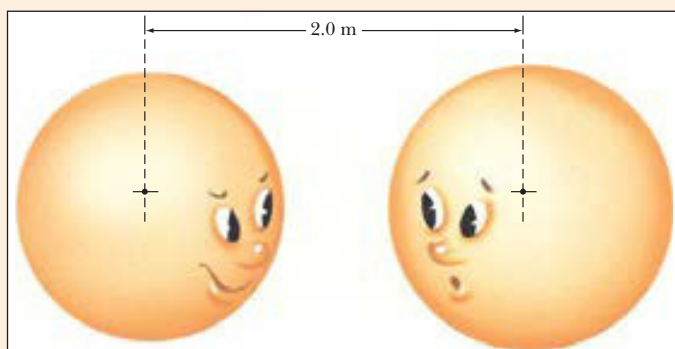
## SOLUCIÓN | Gravedad



Calculemos la fuerza gravitacional entre dos amigos. Para facilitar el cálculo de esta fuerza, hacemos una suposición poco realista: ¡suponemos que los amigos son esferas! Esto nos permite utilizar la distancia entre sus centros como su separación y todavía obtener una respuesta razonable. Suponiendo que los amigos tienen masas de 70 y 86 kg (alrededor de 154 y 189 lb, respectivamente) y están separados una distancia de 2 m, tenemos

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2} = \left( 6.67 \times 10^{-11} \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{kg}^2} \right) \frac{(70 \text{ kg})(86 \text{ kg})}{(2 \text{ m})^2} = 1.00 \times 10^{-7} \text{ N}$$

Esta fuerza infinitesimal es aproximadamente 1 mil millonésimo ( $10^{-10}$ ) del peso de cualquiera de los amigos.



La atracción entre estos dos amigos esféricos depende de la distancia entre sus centros.

## Razonamiento defectuoso



En la exitosa película *Armageddon*, los héroes aterrizan su transbordador espacial en un cometa del tamaño de Texas que se inclina hacia la Tierra. Después caminan sobre el cometa igual que los trabajadores de la construcción aquí en la Tierra. **¿Qué tiene de incorrecto esta imagen?**

**Respuesta** Un cometa no tiene la masa suficiente para proporcionar la gravedad requerida para caminar normalmente. Los astronautas hubieran tenido que atarse juntos para no salir volando con el mínimo esfuerzo. Los astronautas estaban atados en otra película de un cometa que venía a destruir la Tierra, *Impacto profundo*.

## Gravedad cerca de la superficie terrestre



En los capítulos iniciales supusimos que la fuerza de gravedad sobre un objeto era constante cerca de la superficie terrestre. Pudimos hacer esto porque la fuerza cambia muy poco sobre las distancias en cuestión. De hecho, suponer lo contrario hubiera complicado innecesariamente el asunto.

Cerca de la superficie terrestre, la fuerza gravitacional disminuye por una parte en un millón por cada 3 metros (alrededor de 10 pies) de aumento en la elevación. Por lo tanto, un objeto que pesa 1 newton en la superficie terrestre, pesaría 0.999 999 newtons en una elevación de 3 metros. Una persona con una masa de 50 kilogramos tiene un peso de 500 newtons (110 libras) en la ciudad de Nueva York; esta persona pesaría alrededor de 0.25 newtons (1 onza) menos en Denver, que tiene una altura de 1609 metros.

# ¿Cuánto pesa usted?

En el siglo xv, las personas no imaginaban que alguien algún día viajaría a planetas lejanos. No obstante, la ley de la gravitación universal de Newton les permitió predecir lo que pesarían si alguna vez se encontraban en otro planeta.

Según la ley de la gravitación universal de Newton, el peso de una persona en un planeta depende de la masa y el radio del planeta, al igual que de la masa de la persona. Su peso en Júpiter comparado con el que tiene en la Tierra depende de estos factores. Si supone que Júpiter tiene el mismo tamaño de la Tierra (esto no es cierto) pero que tiene 318 veces más masa que la Tierra (cierto) significa que usted pesaría 318 veces más en este Júpiter ficticio que en la Tierra. En realidad, el diámetro de Júpiter es 11.2 veces mayor que el de la Tierra. Debido a que la ley de la gravitación universal contiene el radio al cuadrado en el denominador, en realidad su peso se reduce por un factor de 11.2 al cuadrado, o 125. La combinación de estos factores significa que usted movería una báscula de baño en Júpiter a  $\frac{318}{125}$  o  $2\frac{1}{2}$  veces su peso en la Tierra. Podría pesar menos en Plutón, sólo el 8% de su peso en la Tierra porque la poca masa de Plutón disminuye su peso más de lo que lo aumenta su radio reducido. La tabla siguiente establece su peso en cada uno de los planetas.

En la Luna, la fuerza de gravedad es sólo  $\frac{1}{6}$  de la Tierra. Por lo tanto, el peso de un astronauta es sólo  $\frac{1}{6}$  de lo que sería en la Tierra. Esto significa que los astronautas pueden brincar más alto y caerán con mayor lentitud, como hemos visto en las imágenes de televisión transmitidas a la Tierra durante las exploraciones lunares. Los vehículos diseñados para viajar en la Luna se colapsarían bajo su propio peso en la Tierra.

Tabla 4-1 | Los pesos en cada uno de los planetas

Planeta	Peso relativo	Persona de 150 lb
Mercurio	0.38	57 lb
Venus	0.91	136
Tierra	1.00	150
Marte	0.38	57
Júpiter	2.53	380
Saturno	1.07	160
Urano	0.92	138
Neptuno	1.18	177
Plutón	0.08	12



El explorador lunar colapsaría bajo su peso si se utilizara en la Tierra.

## Razonamiento defectuoso



Usted lee en una revista que la gravedad en la Luna no es tan fuerte como en la Tierra porque en la Luna no hay atmósfera. Esto no parece correcto, así que investiga un poco. ¿Qué descubre?

**Respuesta** El origen de la atracción gravitacional es la masa, no el aire. La atracción gravitacional sobre la Luna es menor que en la Tierra porque la masa de la Luna es mucho menor que la de la Tierra. En realidad, el argumento en la revista está completamente al revés. La Luna no tiene atmósfera porque su gravedad es demasiado débil para contenerla.



Los pasajeros en este avión pesan menos debido a su altitud.

Las variaciones en la fuerza gravitacional provocan cambios en la aceleración debida a la gravedad. El valor de la aceleración —que normalmente se representa como  $g$ — es casi constante cerca de la superficie terrestre. Siempre y cuando uno permanezca cerca de la superficie, la distancia entre el objeto y el centro de la Tierra cambia muy ligeramente. Si un objeto se eleva 1 kilómetro (alrededor de  $\frac{5}{8}$  de milla), la distancia cambia de 6378 a 6379 kilómetros, y  $g$  cambia sólo de 9.800 (metros por segundo) por segundo a 9.797 (metros por segundo) por segundo.

Sin embargo, incluso sin un cambio en la elevación,  $g$  no es estrictamente constante de un lugar a otro. La Tierra necesitaría estar formada por capas esféricas, y que cada capa fuera uniforme; este no es el caso. Los depósitos subterráneos de sal tienen menos masa por metro cúbico y producen valores menores de  $g$  que el promedio, mientras que los depósitos de metales producen valores de  $g$  más grandes.



Por lo tanto, las medidas de  $g$  sirven para localizar depósitos minerales subterráneos de gran tamaño. Al detectar variaciones, los geólogos pueden ubicar regiones para una exploración más detallada.

**Pregunta** Debido a que el agua tiene menos masa por metro cúbico que el suelo y la roca, ¿esperaría que sobre un lago el valor de  $g$  fuera menor o mayor que el promedio?

**Respuesta** Un metro cúbico de agua proporcionaría menos atracción que un metro cúbico de tierra y roca. Por lo tanto, el valor de  $g$  sería menor.

El valor experimental de  $g$  también varía con la latitud debido a la rotación de la Tierra sobre su eje. El valor es el mínimo cerca del Ecuador y aumenta hacia cada polo.

## Satélites

### ✓ MATEMÁTICAS

La teoría de Newton también predice las órbitas de los satélites que orbitan la Tierra. Al saber cómo cambia la fuerza con la distancia desde la Tierra, sabemos cuáles aceleraciones —y, por consiguiente, otras características orbitales— esperar en diferentes altitudes. Por ejemplo, un satélite a una altura de 200 kilómetros debe orbitar la Tierra en 88.5 minutos. Esto se acerca a la órbita del satélite *Vostok 6* que llevó a la primera mujer, Valentina Tereskova, en una órbita terrestre en junio de 1963. La altura de su órbita variaba de 170 a 210 kilómetros y tenía un periodo de poco más de 88 minutos.

### FÍSICA | HÁGALO USTED MISMO

Muchos satélites tienen órbitas norte-sur con periodos de aproximadamente 90 minutos. Atisbe el cielo nocturno cerca de la estrella polar hasta que localice uno de estos satélites que se mueven hacia el sur. Calcule el tiempo que pasa este satélite sobre el horizonte. ¿Por qué este tiempo es mucho más breve que 45 minutos?

Entre más alta es la órbita de un satélite, más tiempo tarda en completarla. La Luna tarda 27.3 días; *Vostok 6* tardaba 88 minutos. Es posible calcular la altura que un satélite necesitaría para tener un periodo de 1 día. Con esta órbita, si el satélite se posicionara sobre el Ecuador, parecería que permanece fijo directamente sobre un punto sobre la Tierra: una órbita llamada geosíncrona. Tales satélites geosíncronos tienen una altitud de 36 000 kilómetros, o alrededor de  $5\frac{1}{2}$  radios de la Tierra, y son útiles para establecer redes de comunicaciones a nivel mundial. Los platos de los satélites caseros que captan las señales de televisión apuntan a los satélites



© Tzemanet/Dreamstime

Los platos de los satélites apuntan a los satélites de comunicaciones que recorren órbitas geosíncronas sobre el Ecuador de la Tierra.



© NASA

Los satélites climáticos GEOS orbitan la Tierra una vez cada día, y mantienen ubicaciones fijas sobre el Ecuador.



geosíncronos. El primer satélite geosíncrono exitoso fue el *Syncom II*, lanzado en julio de 1963. Algunos satélites geosíncronos sirven para vigilar el clima en la Tierra.

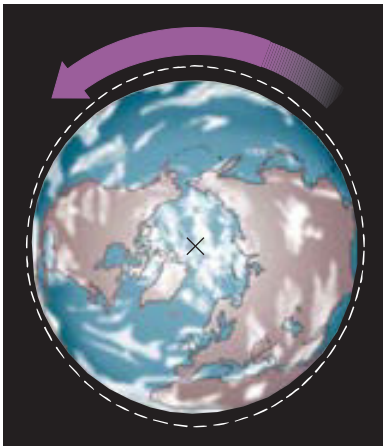
**Pregunta** Si pudiera detectar un satélite geosíncrono en el cielo, ¿cómo lo diferenciaría de una estrella?

**Respuesta** El satélite se mantiene en la misma ubicación en el cielo, mientras que la estrella deriva hacia el oeste mientras la Tierra gira bajo ellos.

#### FÍSICA | HÁGALO USTED MISMO

Calcule las ubicaciones de los satélites climáticos con base en las vistas de Norteamérica que presentan durante la predicción climática de un noticiario y su conocimiento de las órbitas posibles de los satélites geosíncronos.

Cualquier sonda espacial requiere los mismos cálculos que los efectuados para los satélites; las computadoras de la NASA determinan las trayectorias para los vuelos espaciales mediante las leyes del movimiento y la ley de la gravitación de Newton. Las fuerzas sobre la nave espacial en cualquier momento dependen de las posiciones de los otros cuerpos en el sistema solar. Éstas se pueden calcular con la ecuación de la gravitación al insertar la distancia hacia cada cuerpo y su masa. La fuerza neta produce una aceleración de la nave espacial que cambia su velocidad. A partir de esto, la computadora calcula una nueva posición para la nave espacial. También calcula posiciones nuevas para los otros cuerpos celestes, y el proceso vuelve a comenzar. De esta manera, la computadora grafica la trayectoria de la nave espacial por el sistema solar.



**Figura 4-4** Las protuberancias oceánicas exageradas. Cuando la Tierra gira, las protuberancias parecen desplazarse alrededor de la superficie terrestre.

## Mareas

Antes de la obra de Newton con la gravedad, nadie fue capaz de explicar por qué tenemos mareas. Se sabían algunas cosas. Las mareas se deben a las protuberancias en la superficie de los océanos de la Tierra. Existen dos protuberancias, una en cada lado de la Tierra, como se observa en la figura 4-4. La ocurrencia de mareas en un lugar determinado se debe a la rotación de la Tierra. Imagine por sencillez que las protuberancias son estacionarias —apuntan a cierta dirección en el espacio— y que la Tierra gira. Cada punto en la Tierra pasa por ambas protuberancias en 24 horas y en esos momentos tenemos mareas altas. Las mareas bajas ocurren cuando las protuberancias están a la mitad. De modo que cada día tenemos dos mareas bajas y dos altas.

Lo que no se sabía era por qué la Tierra tenía estas protuberancias. Newton afirmó que se debían a la gravedad de la Luna. La Tierra ejerce una fuerza gravitacional sobre la Luna que hace que la Luna la orbite. Pero la Luna ejerce una fuerza igual y opuesta sobre la Tierra que provoca que la Tierra orbite la Luna. En realidad, la Tierra y la Luna orbitan un punto común ubicado entre ellas. Este punto es el centro de la masa del sistema Tierra-Luna. Debido a que la masa de la Tierra es mayor que la de la Luna, el centro de la masa está mucho más cerca de la Tierra. De hecho, se ubica dentro de la Tierra, como se observa en la figura 4-5. El movimiento orbital de la Tierra le parecería un bamboleo a alguien que lo observara desde muy arriba del polo norte. Pero es una órbita.

**Pregunta** ¿Las fuerzas entre la Tierra y la Luna son un par de la tercera ley?

**Respuesta** Sí, una es la fuerza de la *Tierra sobre la Luna*, y la otra es la fuerza de la *Luna sobre la Tierra*.

Debido a que la Tierra tiene un movimiento orbital, podemos usar las conclusiones desarrolladas para el movimiento de la Luna como ayuda para comprender las mareas de la Tierra. Por ejemplo, como concluimos que la Luna cae continua-



**Figura 4-5** El centro de la masa del sistema Tierra-Luna se ubica dentro de la Tierra.

mente hacia la Tierra, entonces la Tierra cae continuamente hacia la Luna. Esta aceleración centrípeta hacia la Luna es la clave para comprender las protuberancias de las mareas.

Olvide por un momento que la Tierra se mueve a lo largo de su órbita y sólo considere que la Tierra cae hacia la Luna, igual que en la figura 4-6. Esta aceleración es lo que más contribuye para las mareas. Debido a que la fuerza de la gravedad de la Luna se debilita conforme aumenta la distancia, la fuerza en diferentes partes de la Tierra es distinta. Por ejemplo, en el lado más cercano a la Luna, 1 kg de agua del océano experimenta una fuerza más intensa que una masa de roca igual en el centro de la Tierra. Asimismo, 1 kg de material en el lado lejano de la Tierra siente una fuerza menos intensa que un kilogramo en el lado cercano y uno en el centro.

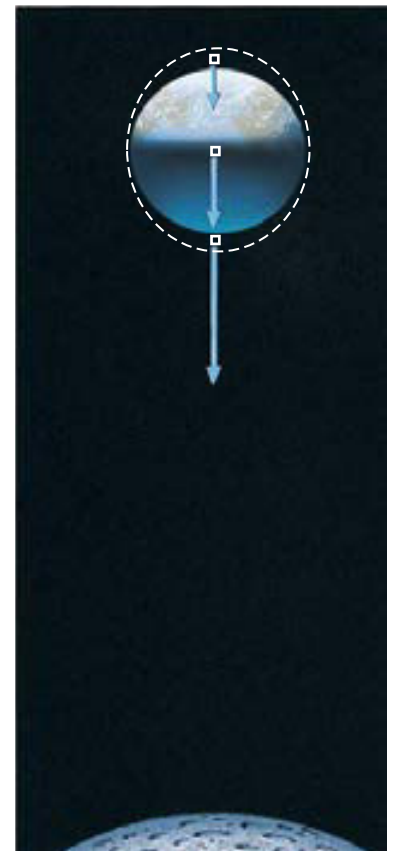
Si existen fuerzas de diferente magnitud en diversos lugares en la Tierra, existen aceleraciones distintas para cada lugar. Algunos lugares de la Tierra caen más rápido hacia la Luna que otros. El material en el lado de la Tierra que está frente a la Luna intenta adelantarse, mientras que el material en el otro lado se retrasa. Supuesto, la Tierra tiene fuerzas internas que la mantienen unida y que terminan por equilibrar estas desigualdades. Pero terminamos con una Tierra estirada.

Aunque este razonamiento explica la ocurrencia de dos mareas altas cada día, es demasiado sencillo para exponer los detalles correctamente. Observamos que las mareas altas no ocurren a la misma hora cada día. Esto sucede porque la Luna orbita una vez al mes una Tierra que gira. El intervalo de tiempo normal entre mareas altas sucesivas son 12 horas y 25 minutos. Las mareas altas no ocurren cuando la Luna está arriba, sino más tarde, hasta 6 horas después. Esto se debe a factores como los efectos de la fricción y de la inercia del agua y la profundidades variables del océano.

Si bien la diferencia en altura entre las mareas baja y alta en medio del océano es de sólo 1 metro, la forma de la costa puede ampliar mucho las mareas. Las mareas más grandes ocurren en la bahía de Fundy, en el litoral este entre Canadá y Estados Unidos; ahí el rango máximo de marea baja a alta son 16 metros (54 pies).

También esperaríamos observar mareas solares debido a que el Sol también ejerce una atracción gravitacional sobre la Tierra y la Tierra “cae” hacia el Sol. Ocurren, pero tienen alturas de menos de la mitad de las producidas por la Luna. Este valor puede parecer muy bajo, tomando en consideración que la fuerza gravitacional del Sol sobre la Tierra es alrededor de 180 veces más grande que la de la Luna. El efecto solar es tan reducido porque lo que importa es la diferencia en la fuerza de un lado de la Tierra y no el tamaño absoluto. Las mareas debidas a los planetas son todavía más pequeñas, y la de Júpiter es menos de un diezmillonésimo de la debida al Sol.

Los continentes son mucho más rígidos que los océanos. Incluso así, la Tierra experimenta efectos de marea mensurables. Las áreas continentales pueden elevarse y caer hasta 23 centímetros (9 pulgadas). Debido a que sube y baja el área completa, no sentimos este efecto.



**Figura 4-6** Las masas iguales en la Tierra experimentan fuerzas gravitacionales diferentes debido a sus distintas distancias de la Luna. El efecto se exagera en el diagrama.



© Werner Münzker/Dreamstime



© Richard Mc Nab/Dreamstime

Fotografías de las mareas baja y alta.

**Pregunta** ¿La altura de la marea alta se relaciona con la fase de la Luna? Es decir, ¿es más alta cuando el Sol y la Luna están en el mismo lado de la Tierra (Luna nueva), cuando están en lados opuestos (Luna llena), o cuando están en ángulos rectos entre sí (cuarto creciente o cuarto menguante)?

**Respuesta** Las mareas altas y las mareas bajas más pronunciadas ocurren cuando hay Luna nueva y Luna llena, y la Tierra, la Luna y el Sol están alineados.

## ¿Qué tan lejos llega la gravedad?

La ley de la gravitación ha sido probada exhaustivamente dentro del sistema solar. Explica los movimientos de los planetas, incluyendo sus irregularidades debidas a la atracción mutua de todos los otros planetas.

¿Acaso hay pruebas fuera del sistema solar? No hemos enviado sondas ahí. Sin embargo, somos afortunados, porque la naturaleza nos proporciona sondas a la medida. Los astrónomos observan que muchas estrellas de nuestra galaxia dan vueltas alrededor de una estrella compañera. Estos sistemas de estrella binaria son la regla, no la excepción. Estos pares giran entre sí en exactamente en el modo predicho por las leyes de Newton.

En ocasiones, se detecta una estrella que parece estar sola y no obstante se mueve en una trayectoria elíptica. Nuestra fe en las leyes de Newton es tan grande que suponemos que existe una estrella compañera; sólo que no es visible. Algunas de estas estrellas invisibles se han detectado después porque emiten señales diferentes a la luz visible.

Las fotografías de racimos de estrellas demuestran que ocurre interacción gravitacional entre las estrellas. De hecho, las medidas muestran que todas las estrellas en la galaxia Vía Láctea giran respecto a un punto común bajo la influencia de la gravedad. Esto se ha utilizado para calcular la masa total de la galaxia y el número de estrellas en ella. El tamaño y la forma de la galaxia Vía Láctea son muy similares a los de nuestra vecina, la galaxia de Andrómeda.

Tales éxitos son una notable comprobación del genio de Newton. Durante más de dos siglos, los científicos aplicaron sus leyes del movimiento y la ley de la gravitación sin descubrir discrepancias. Sin embargo, en algún momento se descubrieron algunas excepciones a la visión del mundo newtoniana. La admisión de estas excepciones no debe rebajar su fama. Sólo ocurren cuando nos aventuramos muy lejos del reino de nuestros sentidos ordinarios. En el mundo de las velocidades muy altas y las masas muy grandes, debemos reemplazar las ideas de Newton con las teorías de la relatividad general especial. En el mundo de lo extremadamente pequeño, debemos aplicar las teorías de la mecánica cuántica. Sin embargo, debe señalarse que cuando estas teorías más recientes se aplican en el reino donde funcionan las leyes de Newton, las teorías nuevas producen los mismos resultados.



© NASA

Los racimos de estrellas ofrecen evidencia de la acción de la gravedad entre las estrellas.



La galaxia de Andrómeda es similar a nuestra propia galaxia, la Vía Láctea.

© Marcel Clemens/Shutterstock

Tampoco sabemos si el valor de  $G$  varía con el tiempo. No se ha detectado dicha variación, pero podría existir una pequeña variación con el tiempo. Debido a que todavía es limitada la exactitud de las mediciones de  $G$ , se ha sugerido que la NASA orbite dos satélites entre sí. El conocimiento preciso de las masas de los satélites, al igual que la información de sus órbitas, nos ofrecería un valor más exacto para  $G$ .

## El concepto de campo

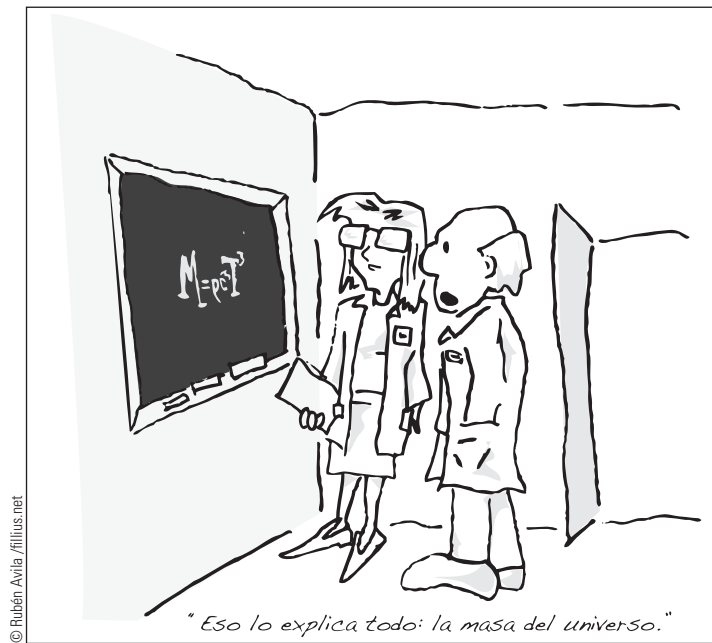
De manera implícita, hemos supuesto que la fuerza entre las masas es el resultado de algún tipo de interacción directa: una especie de interacción con acción a distancia. Este tipo de interacción es un poco inquietante porque no hay un mecanismo de impulso o atracción en el espacio participante. Los efectos gravitacionales son evidentes incluso en situaciones en las cuales existe un vacío entre las masas.

De manera conceptual y para los cálculos es útil separar la interacción gravitacional en dos pasos distintos mediante el concepto de **campo**. Primero, uno de los objetos modifica, en virtud de su masa, el espacio circundante que produce un **campo gravitacional** en cada punto en el espacio. Segundo, el otro objeto interactúa, en virtud de su masa, con este campo gravitacional para experimentar la fuerza. El concepto de campo divide la tarea de determinar la fuerza de una masa en dos partes distintas: determinar el campo de la primera masa y después calcular la fuerza que ejerce este campo sobre la segunda masa.

Si éste fuera el único propósito de la idea de campo, representaría una función menor en nuestra visión del mundo de la física. De hecho, es probable que pareciera que cambiamos una idea inquietante por otra. Sin embargo, conforme avancemos en estos estudios, encontraremos que el campo adopta una identidad propia y es una valiosa ayuda para comprender éstos y muchos otros fenómenos.

Por convención, el valor del campo gravitacional en cualquier punto en el espacio es igual a la fuerza que experimentaría una masa de 1 kg si se colocara en ese punto. En tal caso, la fuerza gravitacional de cualquier otro objeto es el producto de su masa y el campo gravitacional en ese punto. Si usted sostiene un bloque de 1 kilogramo cerca de la superficie terrestre, experimenta una fuerza gravitacional de 10 newtons. Por lo tanto, el campo gravitacional tiene una magnitud de 10 newtons por kilogramo en ese punto. Si usted reemplaza este bloque con uno de 5 kilogramos, la fuerza gravitacional cambia a 50 newtons; esto es sólo el producto de (5 kilogramos) y (10 newtons por kilogramo). También vemos que no necesitamos utilizar un bloque de 1 kilogramo para determinar el campo gravitacional. Con la misma facilidad podemos emplear el bloque de 5 kilogramos y dividir la

◀ Campo gravitacional



fuerza resultante entre la masa del bloque: (50 newtons)/(5 kilogramos) = 10 newtons por kilogramo.

Debido a que la fuerza es una cantidad de vector, el campo gravitacional es un campo de vector; tiene una magnitud y una dirección en cada punto en el espacio. Suele ser conveniente mencionar el campo gravitacional y no la fuerza gravitacional. La intensidad de la fuerza gravitacional depende del objeto que se considera, mientras que la intensidad del campo gravitacional es independiente del objeto.

En el capítulo anterior observamos que la fuerza gravitacional  $\mathbf{W}$  se expresa mediante la segunda ley de Newton como

$$\mathbf{W} = m\mathbf{g}$$

en donde  $\mathbf{g}$  es la aceleración debida a la gravedad, 9.8 (metros por segundo) por segundo. Debido a que la fuerza gravitacional es igual a la masa por el *campo* gravitacional o la *aceleración* gravitacional, estos dos valores deben ser numéricamente iguales. En realidad, aplicamos el símbolo  $\mathbf{g}$  para el campo gravitacional y la aceleración debida a la gravedad. También mostramos que los newtons por kilogramo se pueden reescribir como (metros por segundo) por segundo.

## Resumen

Aunque nadie sabe qué es la gravedad o por qué existe, podemos describir con exactitud cómo la gravedad afecta los movimientos de los objetos. Las mismas leyes del movimiento funcionan en la Tierra y en los cielos. La ley de la gravitación universal de Newton afirma que existe una atracción gravitacional entre cada par de objetos y se obtiene mediante

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

en donde  $m_1$  y  $m_2$  son las masas de los dos objetos,  $r$  es la distancia entre sus centros, y  $G$  es la constante gravitacional. Cavendish fue el primero en determinar el valor de  $G$  y se considera que es constante con el tiempo y el espacio.

Entre más alta es la órbita de un satélite, más tiempo tarda éste en completarla. Un satélite con un periodo de 1 día y posicionado sobre el Ecuador parece que permanece fijo en el cielo. La Luna, un satélite natural, tarda 27.3 días para completar una órbita alrededor de la Tierra.



La fuerza de gravedad se puede considerar constante cuando el movimiento ocurre sobre distancias cortas, cerca de la superficie terrestre. Sin embargo, ocurren pequeñas variaciones en la aceleración debida a la gravedad con la latitud, la elevación, y los tipos de materiales de la superficie. En distancias más grandes, la fuerza disminuye con el cuadrado de la distancia. Las estrellas en los sistemas binarios giran una alrededor de la otra y el movimiento de las estrellas dentro de las galaxias apoya esta idea.

El valor del campo gravitacional en cualquier punto en el espacio es igual a la fuerza que experimenta una masa de 1 kilogramo colocada en ese punto.

## Capítulo 4



## Revisión

El estudio de los movimientos de los objetos celestiales distantes, al igual que las distribuciones de las masas dentro de los sistemas con muchas partículas, como los racimos globulares y las galaxias, aporta evidencia directa de que la gravedad se extiende por todo el universo visible.

## TÉRMINOS IMPORTANTES

**campo:** Una región del espacio que tiene un número o un vector asignado a cada punto.

**campo gravitacional:** La fuerza gravitacional que experimenta una masa de 1 kilogramo colocada en un punto en el espacio.

**cuadrado inverso:** Una relación en la cual una cantidad se relaciona con el recíproco del cuadrado de una segunda cantidad. Un ejemplo es la ley de la gravitación universal; la fuerza es inversa-

mente proporcional al cuadrado de la distancia. Si se duplica la distancia, la fuerza disminuye por un factor de cuatro.

**ley de la gravitación universal:** Todas las masas ejercen fuerzas sobre todas las otras masas. La fuerza  $F$  entre dos objetos se obtiene mediante  $F = Gm_1m_2/r^2$ , en donde  $G$  es una constante universal,  $m_1$  y  $m_2$  son las masas de los dos objetos,  $r$  es la distancia entre sus centros.

## PREGUNTAS CONCEPTUALES

1. ¿Cuál fuerza (si es el caso) impulsa los planetas a lo largo de sus órbitas?
2. ¿Cuál fuerza (si es el caso) hace que los planetas ejecuten órbitas (casi) circulares?
3. ¿La magnitud de la fuerza gravitacional que ejerce la Tierra sobre la Luna es menor que, mayor que, o igual a la magnitud de la fuerza que la Luna ejerce sobre la Tierra? ¿Por qué?

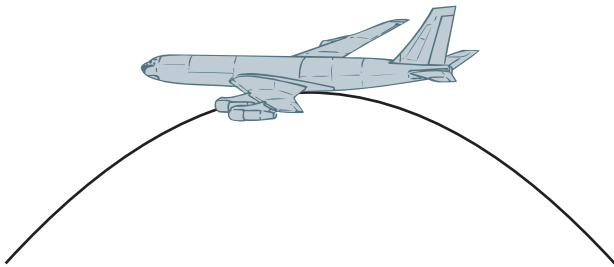


© NASA

4. La Tierra ejerce una fuerza gravitacional de más de 1 millón de newtons sobre la Estación Espacial Internacional (EEI). ¿Qué fuerza ejerce la EEI sobre la Tierra?
5. ¿Cómo se compara la aceleración promedio de la Luna respecto al Sol con la de la Tierra respecto al Sol?
6. Si se pusiera una manzana en órbita a la misma distancia de la Tierra que de la Luna, ¿qué aceleración tendría la manzana?
7. ¿Qué le ocurre al área de la superficie de un cubo cuando se duplica la longitud de cada lado? ¿Cómo se compara esto con lo que le sucede al área de la superficie de una esfera cuando se duplica su radio?
8. ¿Qué le sucede al volumen de un cubo si se duplica la longitud de cada lado? ¿Cómo se compara esto con lo que le pasa al volumen de una esfera cuando se duplica su radio?
9. Skip Parsec, un viajero del espacio en el futuro, aterriza en el planeta MSU3, el cual tiene la misma masa que la Tierra, pero el doble de radio. Si Skip pesa 800 newtons en la superficie terrestre, ¿cuánto pesa en la superficie de MSU3?
- ▲ 10. El astronauta Skip visita el planeta MSU8, el cual está formado por los mismos materiales que la Tierra, pero su radio es el doble. Si Skip pesa 800 newtons en la superficie terrestre, ¿cuánto pesa en la superficie de MSU8?
11. ¿Por qué Newton no tuvo que saber la masa de la Luna para obtener la ley de la gravitación universal?
12. Comente la afirmación siguiente efectuada por un locutor de televisión durante el vuelo a la Luna de una nave Apolo: "En este momento, la nave abandona la fuerza gravitacional de la Tierra."
13. En un universo paralelo, existe un planeta con la misma masa y radio que la Tierra. Sin embargo, cuando se deja

caer una manzana en este planeta, cae con una aceleración de 20 (metros por segundo) por segundo. ¿Cuál es el valor de la constante gravitacional  $G$  en este universo paralelo?

- ▲ 14. Por sencillez utilizamos 10 (metros por segundo) por segundo para la aceleración debida a la gravedad, en lugar del valor más exacto 9.8 (metros por segundo) por segundo. Si Cavendish hubiera hecho la misma aproximación, ¿su estimado para la masa de la Tierra hubiera sido demasiado alto o demasiado bajo?
- 15. Si un satélite en una órbita circular sobre la Tierra “cae” de manera continua, ¿por qué no regresa rápido a la Tierra?
- 16. En un satélite que orbita la Tierra, la fuerza gravitacional lo atrae constantemente hacia adentro. ¿Qué contrarresta esta fuerza?
- 17. El astronauta Story Musgrave tardó un total de 1281 horas, 59 minutos y 22 segundos en el espacio en sus seis misiones en un transbordador espacial. Si la masa de Story era de 80 kilogramos, la fuerza gravitacional que actuaba sobre él en órbita era de alrededor de 730 newtons. ¿Por qué se sentía ingrátido?
- 18. Usted está parado sobre una báscula de baño dentro de un elevador, cuando de repente se rompe un cable y el elevador experimenta una caída libre en su pozo. ¿Cómo cambia la lectura de la balanza justo antes y justo después que se rompe el cable?
- 19. La NASA utiliza el famoso Vomit Comet, un avión de carga KC-135, para proporcionar a los astronautas y los científicos un ambiente simulado de gravedad cero. El avión vuela en una serie de arcos parabólicos, como se observa en la figura. Explique por qué los pasajeros se sienten “ingrátidos” cuando el avión está cerca de la parte superior de su arco.



- 20. Sin duda ha visto fotografías de los astronautas flotando en el interior de un transbordador espacial que orbita a unos 300 kilómetros sobre la superficie terrestre. ¿La fuerza de gravedad que la Tierra ejerce sobre un astronauta sería igual, un poco menor, o mucho menor que la fuerza que el astronauta experimentaría en la superficie terrestre? ¿Por qué?
- ▲ 21. Si la Tierra estuviera hueca pero todavía tuviera la misma masa y radio, ¿usted tendría un peso diferente? ¿Por qué?
- 22. Los astrónomos creen que cuando se formó la Tierra, su composición era uniforme. Con el tiempo, los materiales más pesados se hundieron al interior para crear un núcleo denso de hierro, y los materiales menos densos quedaron en el exterior. ¿Cómo cambió el valor de la aceleración debida a la gravedad en la superficie terrestre mientras ocurría este proceso?
- 23. La fuerza gravitacional entre dos libros que están sobre una mesa no hace que aceleren uno hacia el otro debido a las fuerzas friccionales. Si estos dos mismos libros flotaran

uno cerca del otro en el espacio exterior, todavía no parecería que aceleran uno hacia el otro. ¿Por qué no?

- ▲ 24. ¿Por qué utilizamos la forma  $W = mg$  para la fuerza gravitacional sobre un objeto cerca de la Tierra, pero usamos la forma  $F = Gm_1m_2/r^2$  cuando el objeto está lejos de la Tierra?
- 25. El Skylab provocó una verdadera conmoción cuando regresó a la Tierra en julio de 1979. ¿Por qué de repente retornaría a la Tierra después de haber estado en órbita tantos años?



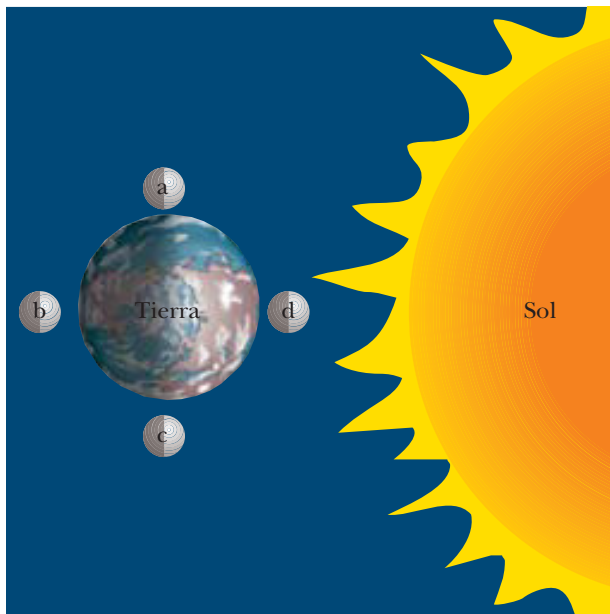
© NASA

- 26. Cuando el transbordador espacial *Discovery* lanzó por primera vez al espacio el Telescopio Espacial Hubble (TEH), su órbita aproximadamente circular estaba en una altitud de alrededor de 600 kilómetros. Sin embargo durante los varios años siguientes, la altitud se redujo, de modo que las siguientes misiones para darle servicio se propusieron devolver el TEH a su órbita más alta. ¿A qué se debió el descenso orbital?
- 27. ¿Cómo podemos determinar la masa de un planeta como Venus, que no tiene luna?
- 28. ¿Por qué no podemos determinar la masa de la Luna al observar que rodea la Tierra en una órbita casi circular? ¿Cómo podemos determinar la masa de la Luna?
- 29. ¿Esperaría que el valor de la aceleración debida a la gravedad fuera mayor o menor de lo normal sobre un enorme depósito de mineral de uranio? ¿Por qué?
- 30. Usted atraviesa el Océano Atlántico en un crucero grande. ¿Qué le ocurre a su peso cuando la nave deja las aguas profundas del Atlántico Norte y entra a las poco profundas aguas costeras de Estados Unidos?
- 31. ¿Cuáles cambios ocurrirían en el sistema solar si la constante gravitacional  $G$  poco a poco se hiciera más grande?
- 32. ¿Qué cree que le ocurriría a la órbita de la Luna si la atracción gravitacional entre la Luna y la Tierra lentamente se volviera más fuerte?
- 33. ¿Es posible que un satélite de la Tierra permanezca estacionario sobre París? ¿Por qué sí o por qué no?
- 34. Durante la guerra del golfo con Irak en 1991, un relato en un periódico informó que satélites espías estadounidenses estaban en órbitas estacionarias sobre Irak, y aportaban sin cesar información de inteligencia. Explique por qué esto es imposible.

- ▲ 35. Suponga que la NASA no consigue poner un satélite de comunicaciones en una órbita geosíncrona. Si la órbita es demasiado grande, ¿cómo parecerá el movimiento del satélite visto desde la Tierra que gira?
- 36. Algunos de los satélites terrestres de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) permanecen sobre un solo lugar en la Tierra. ¿Por qué estos satélites geosíncronos no caen a la Tierra bajo la influencia de la gravedad?
- 37. La tercera ley de Newton afirma que la fuerza gravitacional que ejerce la Luna sobre la Tierra es igual a la que ejerce la Tierra sobre la Luna. Entonces, ¿por qué la Tierra no parece orbitar la Luna?
- 38. El Sol afecta mucho el movimiento de la Tierra. ¿La Tierra afecta el movimiento del Sol? Explique.
- 39. Cuando la marea está alta a lo largo de la costa occidental estadounidense, ¿la marea en Japón está más cerca de la marea alta o de la marea baja?
- 40. Cuando hay marea alta en la costa de Ecuador, ¿la marea ubicada en la costa de Indonesia, a  $180^\circ$  (al otro lado del mundo), está más cerca de la marea alta o de la baja?
- 41. Júpiter gira una vez en 9 horas y 50 minutos. ¿Cuánto tiempo transcurre entre las mareas altas en su atmósfera?
- ▲ 42. Se aprecia que la Luna mantiene la misma cara hacia la Tierra en todo momento. Si la Luna tuviera océanos, ¿cuánto tiempo transcurriría entre sus mareas altas?
- 43. ¿Cuál posición en la figura corresponde a la Luna nueva? Esto es, cuando la Luna está sobre el horizonte, pero no se ve por qué la cara iluminada queda oculta por la Tierra. ¿Por qué las mareas altas son más pronunciadas de lo normal durante esta fase?
- 44. ¿Cuál posición en la figura corresponde a la Luna llena,

que es cuando la Luna parece un disco completamente iluminado? ¿Por qué las mareas altas son más pronunciadas de lo normal durante esta fase?

- 45. Un compañero afirma que cuando la Luna está en la posición b de la figura, los efectos gravitacionales en el Sol y la Luna tienden a cancelarse, lo cual genera mareas altas menos pronunciadas de lo normal. ¿Qué tiene de incorrecto este razonamiento?
- 46. ¿Cuáles posiciones de la Luna en la figura corresponden a la diferencia más pequeña entre la marea alta y la marea baja?
- ▲ 47. En *El Efecto Júpiter*, los autores John Gribbin y Stephen Plagemann afirman que la fuerza adicional de las mareas producida cuando todos los planetas están en línea puede ser suficiente para activar un terremoto a lo largo de la falla de San Andrés en California. ¿Qué opina usted acerca de esta posibilidad?
- ▲ 48. ¿Por qué la inercia y la fricción del agua harían que ocurrieran mareas cuando la Luna está en lo alto?
- 49. ¿Cómo cambia la magnitud del campo gravitacional de la Tierra cuando aumenta la distancia?
- 50. Demuestre que las unidades newtons por kilogramo son equivalentes a las unidades (metros por segundo) por segundo.
- 51. ¿Es posible que el campo gravitacional apunte en dos direcciones diferentes en el mismo lugar en el espacio? ¿Por qué sí o por qué no?
- 52. ¿Cuáles de los siguientes son independientes de la masa de un objeto en caída libre cerca de la superficie terrestre: la aceleración del objeto, la fuerza gravitacional que actúa sobre el objeto, la fuerza gravitacional que actúa sobre la Tierra, y la magnitud del campo gravitacional?



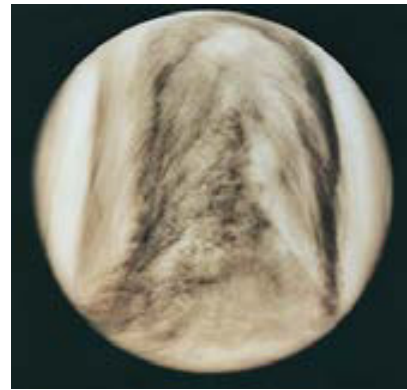
Preguntas 43-46

## EJERCICIOS

- La rapidez de la Tierra en su órbita respecto al Sol es de alrededor de 30 km/s, ¿cuál es la aceleración de la Tierra?
- La rapidez de la Luna en su órbita es aproximadamente 1 km/s, y la distancia de la Tierra a la Luna es 380 000 km. Demuestre que estos números producen una aceleración de la Luna que se acerca mucho a la proporcionada en el texto.
- ¿Cuál es la aceleración debida a la gravedad a una distancia de un radio de la Tierra sobre la superficie terrestre?
- Si usted estuviera a medio camino entre la Tierra y la Luna, ¿cuál aceleración tendría hacia la Tierra? La separación entre la Tierra y la Luna es de 50 radios de la Tierra. (Ignore la fuerza gravitacional de la Luna porque es mucho menor que la de la Tierra.)
- Una esfera sólida de plomo con un radio de 10 m (66 pies) tiene una masa de aproximadamente 57 millones de kg. Si dos de estas esferas flotan en el espacio exterior con sus centros separados 20 m, la atracción gravitacional entre ellas es de sólo 540 N (unas 120 lb). ¿Qué tan grande sería esta fuerza gravitacional si se triplicara la distancia entre los centros de las dos esferas?
- Dos naves espaciales en el espacio exterior se atraen entre sí con una fuerza de 20 N. ¿cuál sería la fuerza de atracción si se redujera a la mitad la distancia entre ellas?
- ¿Cómo cambiaría la fuerza gravitacional del Sol sobre la Tierra si ésta tuviera el doble de su masa actual? ¿Cambiaría la aceleración de la Tierra?
- La fuerza gravitacional entre dos esferas metálicas grandes en el espacio exterior es 50 N. ¿Qué tan grande sería esta fuerza si la masa de cada esfera se redujera a la mitad?
- ¿Cuál es el radio de la fuerza gravitacional sobre usted cuando está a 6400 km sobre la superficie terrestre en comparación a cuando está parado sobre la superficie terrestre? (El radio de la Tierra mide 6400 km.)
- ¿En qué es diferente la fuerza gravitacional de la Tierra sobre usted cuando está de pie en la Tierra y cuando viaja en un transbordador espacial a 400 km sobre la superficie terrestre? (El radio de la Tierra mide 6400 km.)
- Un satélite de 320 kg experimenta una fuerza gravitacional de 800 N. ¿Cuál es el radio de la órbita del satélite? ¿Cuál es su altitud?
- Un satélite geosíncrono de 600 kg tiene un radio orbital de 6.6 radios de la Tierra. ¿Cuánta fuerza gravitacional ejerce la Tierra sobre el satélite?
- ¿Cuál es la fuerza gravitacional entre dos bolas de hierro de 20 kg separadas por una distancia de 0.5 m? ¿Cómo se compara esto con el peso de cada bola?
- Las masas de la Luna y la Tierra miden  $7.4 \times 10^{22}$  kg y  $6 \times 10^{24}$  kg, respectivamente. La distancia entre la Tierra y la Luna es  $3.8 \times 10^8$  m. ¿Cuál es la magnitud de la fuerza gravitacional entre la Tierra y la Luna? ¿La aceleración de

la Luna producida por esta fuerza coincide con el valor mencionado en el texto?

- Si un astronauta con su traje completamente equipado tiene un peso de 1200 N en la Tierra, ¿cuánto pesará el astronauta en la Luna?
- La aceleración debida a la gravedad en Titán, la Luna más grande de Saturno, es de alrededor de  $1.4 \text{ m/s}^2$ . ¿Cuánto pesaría un instrumento científico de 50 kg en Titán?
- Mercurio tiene un radio de alrededor de 0.38 del radio de la Tierra y una masa de sólo 0.55 de la masa de la Tierra. Calcule la aceleración debida a la gravedad en Mercurio.
- Marte tiene un radio de aproximadamente 0.53 del radio de la Tierra y una masa de sólo 0.11 de la masa de la Tierra. Calcule la aceleración debida a la gravedad en Marte.
- Un satélite geosíncrono orbita a una distancia del centro de la Tierra de aproximadamente 6.6 radios de la Tierra y tarda 24 h en dar una vuelta. ¿Qué distancia (en metros) viaja el satélite en un día? ¿Cuál es su velocidad orbital (en m/s)?
- Un satélite de 80 kg orbita un planeta distante con un radio de 4000 km y un periodo de 280 min. A partir del radio y el periodo, usted calcula que la aceleración del satélite es  $0.56 \text{ m/s}^2$ . ¿Cuál es la fuerza gravitacional sobre el satélite?
- El radio de la órbita de Venus es 0.72 veces el radio de la órbita de la Tierra. ¿En donde sería más fuerte el campo gravitacional del Sol, en Venus o en la Tierra?



- ¿Por cuál factor se reduce el campo gravitacional de la Tierra a una distancia de 4 radios de la Tierra desde el centro de la Tierra?
- Si la Tierra se encogiera hasta que su diámetro tuviera sólo la mitad de su tamaño actual sin modificar su masa, ¿cuánto pesaría una masa de 1 kg en su superficie?
- Si la Tierra se expandiera al doble de su diámetro sin modificar su masa, determine la magnitud resultante del campo gravitacional.



# Interludio



*Pingüinos barbijos en un singular iceberg*

© Sergio Boccardo-Shutterstock/Pete Favelle-Dreamstime



# El descubrimiento de las constantes

En la visión del mundo de la física, un tema ha sido que el cambio es una parte esencial del universo. De hecho, el cambio se ha generalizado tanto en nuestra cotidianeidad que tal vez le sorprenda saber que algunas cosas no cambian. En realidad, varias cantidades son constantes. Para que algo sea una constante, el valor numérico asociado no debe variar, es decir, obtenemos el mismo valor todas las veces. Decimos que la cantidad se conserva. En nuestro lenguaje cotidiano, utilizamos la palabra *conservar* para decir que algo se guarda, o cuando menos que se utiliza con moderación. En la física, cuando algo se conserva, permanece constante; su valor no cambia.

Según el psicólogo suizo Jean Piaget, especialista en la infancia, una parte esencial del desarrollo de una persona es el establecimiento de las constantes, o reglas de conservación. Es decir, conforme procesamos información sensorial, creamos estructuras que son componentes relativamente permanentes de nuestras visiones del mundo personales. Gran parte de esta creación ocurre de manera instintiva en una edad temprana. Con toda seguridad no buscamos conscientemente las constantes.

Un ejemplo sorprendente de una constante aprendida que ocurre a una edad muy temprana es la permanencia del tamaño físico de los objetos. Aunque el tamaño de la imagen en su retina se reduce conforme un objeto se aleja de usted, el sentido común le dice que el objeto permanece del mismo tamaño. ¿Cómo sabe usted esto? Piaget afirmaría que debido a que usted ha visto muchas veces que los objetos regresan a sus tamaños originales, por consiguiente ha formado esta constante.

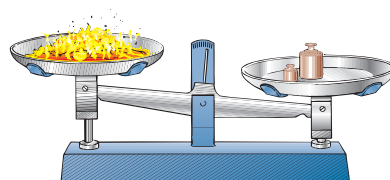
El concepto de que los objetos tienen un tamaño permanente se integra tanto en nuestro sentido común que nuestro cerebro invalida la información sensorial que recibe. Cuando usted percibe que los objetos están lejos a través de indicios de percepción de profundidad, de manera automática compensa las imágenes más pequeñas en la retina. Los artistas pueden crear situaciones no sensoriales al ofrecer a nuestro cerebro información contrastante, como en la ilusión óptica presentada en las fotografías.

Una de las primeras constantes descubiertas fue la cantidad de materia. Cuando se quema un pedazo de madera, pierde casi toda su masa. Esta pérdida es bastante obvia si se quema en una balanza de dos platillos. Conforme arde la madera, un pedazo de la balanza se eleva sin cesar, lo que indica una reducción de su masa. ¿A dónde va la masa

Para que algo sea una constante, el valor numérico asociado no debe variar, es decir, obtenemos el mismo valor todas las veces.

perdida? ¿En realidad desaparece o simplemente escapa en el aire?

La quema de madera en un envase cerrado produce resultados distintos. Siempre y cuando exista aire suficiente para permitir que arda la madera y que no escapen los productos de la quema —las cenizas y el humo—, la balanza se mantiene equilibrada. Por lo tanto, la masa del sistema cerrado no cambia.





Conforme se quema la madera, el lado izquierdo asciende.

Casi al final del siglo XVIII, el químico Antoine Lavoisier efectuó una gran cantidad de experimentos que comprobaban que la masa no cambia cuando ocurren reacciones químicas en matraces cerrados. Estas investigaciones llevaron a la generalización de que es constante la masa de cualquier sistema cerrado. La generalización de Lavoisier se conoce como una ley de la naturaleza; la ley de la **conservación de la masa**. (Cuando estudiemos física nuclear y de la relatividad, descubriremos que esta ley debe modificarse. Sin embargo, para los procesos físicos y químicos comunes, muchos procesos obedecen esta ley con un alto grado de precisión, por lo que es muy útil para analizarlos.)

Se han descubierto otras constantes. Imagine una bola de billar en movimiento que golpea una bola de billar inmóvil en su camino. Después del choque, la primera bola se detiene y la segunda tiene una velocidad igual a la velocidad original de la primera. Parece que algo se transfirió de la primera bola a la segunda. Christian Huygens, un contemporáneo de Galileo y Newton, sugirió que una “cantidad de movimiento” es una constante en este choque. Esta cantidad de movimiento se transfiere de una bola a la otra.

Es difícil descubrir constantes. En su búsqueda, se han hecho grandes esfuerzos y se seguirán haciendo, porque las recompensas lo valen. Su descubrimiento produce intensas generalizaciones en la visión del mundo de la física.

En principio, podemos aplicar la segunda ley de Newton para predecir el movimiento de cualquier objeto, ya sea una hoja, un avión, una bola de billar, o incluso un planeta. Lo único que debemos hacer es determinar la fuerza neta que actúa sobre el objeto y calcular la acele-



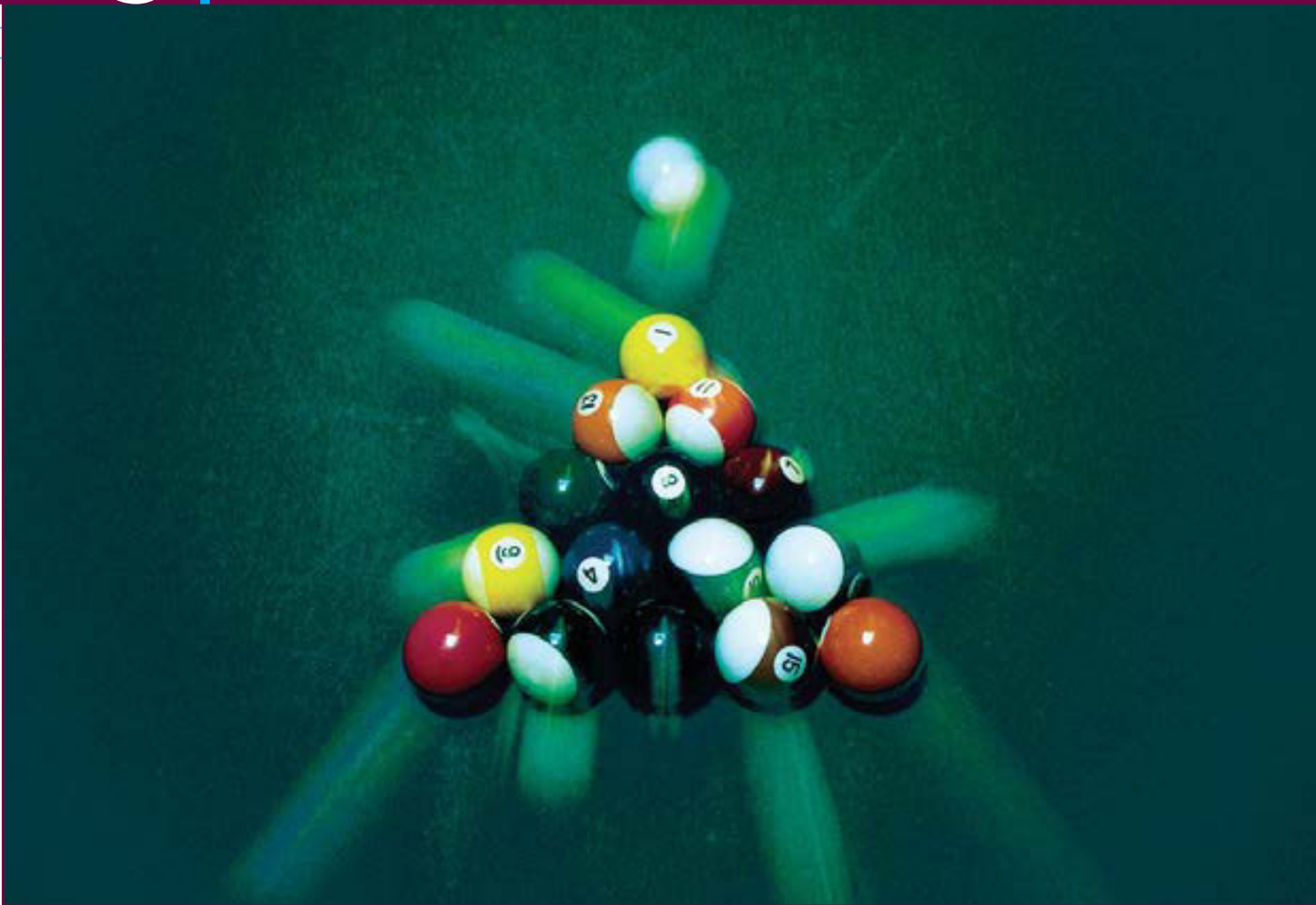
ración resultante. Sin embargo, a menudo resulta muy difícil resolver estas ecuaciones. Para utilizar la segunda ley, necesitamos conocer en todo momento todas las fuerzas que actúan sobre el objeto. Esto es complicado para casi todos los movimientos, porque no suele ser constante la dirección o la magnitud de las fuerzas.

El uso de constantes a menudo permite evitar los detalles de las interacciones individuales. En algunos casos, como los relacionados con fuerzas nucleares, no tiene caso

tratar de evitar estas complicaciones problemáticas, sino más bien se toma el único camino posible; no conocemos las fuerzas lo suficiente para aplicar las leyes de Newton.

En los tres capítulos siguientes, analizaremos tres constantes importantes: el momento lineal, la energía y el momento angular. Estas tres “cantidades de movimiento” nos permiten observar los comportamientos de los objetos y los sistemas de objetos desde un punto de vista completamente nuevo.

# 5 | Momento



© David Rogers

Las colisiones dispersan los objetos en direcciones aparentemente aleatorias. Sin embargo, la naturaleza tiene una pauta —una regla— que controla la trayectoria de cada partícula individual en las colisiones y las explosiones, ya sea un grupo de bolas de billar o las galaxias en colisión. Si la regla predice el futuro, ¿también puede explicarnos el pasado?

---

(Consulte la respuesta a esta pregunta en la página 88.)

---

*Los choques de las bolas de billar ejemplifican la ley de la conservación del momento lineal.*

Sabemos que es más difícil hacer que se mueva un objeto grande que está en reposo que un objeto pequeño. Este es el concepto de inercia que ya hemos incluido en nuestra visión del mundo. También sabemos de manera intuitiva que para dos objetos que se muevan con la misma rapidez, se esperaría que el de mayor masa sea más difícil de detener. Por ejemplo, si una canoa y un barco de guerra se desplazan por la bahía a 5 kilómetros por hora, es evidente que sería más fácil detener la canoa.

Necesitamos agregar un concepto nuevo a nuestra visión del mundo para abordar la cuestión “¿Qué tan difícil sería detener un objeto?”. Llamamos momento a este concepto nuevo, y depende de la masa del objeto y de la rapidez con que se mueve.

## Momento lineal

El **momento lineal** de un objeto se define como el producto de su masa y su velocidad. El momento es una cantidad de vector que tiene la misma dirección que la velocidad. Si utilizamos el símbolo **p** para el momento, escribimos la relación como

$$\mathbf{p} = m\mathbf{v}$$

El adjetivo *lineal* diferencia a éste de otro tipo de momento que analizaremos en el capítulo 7. A menos que exista una posibilidad de confusión, este adjetivo suele omitirse.

No hay una unidad especial para el momento como existe para la fuerza; la unidad del momento es sencillamente la masa por la velocidad (o la rapidez); es decir, kilogramo-metro por segundo ( $\text{kg} \cdot \text{m/s}$ ).

Un objeto puede tener un momento grande debido a una masa grande, a una velocidad grande, o ambas. Un buque de guerra y un auto de carreras impulsado con un cohete tienen momentos grandes.

**Pregunta** ¿Cuál tiene un momento más grande, un camión con 18 ruedas estacionado junto a la acera o un Volkswagen que baja por una colina?

**Respuesta** Como el camión con 18 ruedas tiene una velocidad cero, su momento también es cero. Por lo tanto, el VW tiene un momento más grande siempre y cuando se mueva.

La palabra *momento* se suele utilizar en el lenguaje cotidiano en un sentido mucho más amplio, pero a grandes rasgos todavía coincide con su significado en la visión del mundo de la física; es decir, algo con mucho momento es difícil de detener. Es probable que haya oído decir “No queremos perder momento”. Los entrenadores sienten un aprecio especial por esta palabra.

## Cambio del momento de un objeto

### ✓ MATEMÁTICAS

El momento de un objeto cambia si se modifican su velocidad, su masa, o ambas. Obtenemos una expresión para la magnitud del cambio al reescribir la segunda ley de Newton ( $\mathbf{F}_{\text{neta}} = m\mathbf{a}$ ) en una forma más general. En realidad, la fórmula original de Newton se acerca más a la forma nueva. Newton comprendió que pueden cambiar la masa o la velocidad. Su forma de la segunda ley dice que la fuerza neta es igual al cambio en el momento, dividido entre el tiempo requerido para efectuar este cambio:

$$\mathbf{F}_{\text{neta}} = \frac{\Delta(m\mathbf{v})}{\Delta t}$$



© Misampetro/Dreamstime

La lancha y el portacontenedores tienen momentos diferentes, aunque se muevan con la misma rapidez, porque sus masas son distintas.

◀ momento lineal = masa × velocidad



© Royalty-Free/Corbis

El receptor está protegido del momento de la pelota de béisbol.

✓ El suplemento *Problem Solving* (Solución de problemas) ofrece una presentación extendida.

◀ fuerza neta =  $\frac{\text{cambio en el momento}}{\text{tiempo requerido}}$



Si ahora multiplicamos ambos lados de la ecuación por el intervalo de tiempo  $\Delta t$ , obtenemos una ecuación que nos indica cómo producir un cambio en el momento:

$$\text{impulso} = \text{fuerza neta} \times \text{tiempo} = \text{cambio en el momento}$$

$$\mathbf{F}_{\text{neta}} \Delta t = \Delta(m\mathbf{v})$$

Esta relación indica que este cambio se produce al aplicar una fuerza neta al objeto durante cierto intervalo de tiempo. La interacción que modifica el momento de un objeto —una fuerza que actúa durante un intervalo de tiempo— se llama **impulso**. El impulso es una cantidad de vector que tiene la misma dirección que la fuerza neta.

Debido a que el impulso es un producto de dos cosas, existen muchas maneras de producir un cambio específico en el momento. Por ejemplo, dos maneras de cambiar 10 kilogramos-metros por segundo el momento de un objeto son: ejercer una fuerza neta de 5 newtons sobre el objeto durante 2 segundos o ejercer 100 newtons durante 0.1 segundos. Cada acción produce un impulso de 10 kilogramos-metros por segundo. Las unidades del impulso (newtons-segundos) equivalen a las del momento (kilogramos-metros por segundo).

**Pregunta** ¿Cuál de los siguientes provocará el cambio más grande en el momento de un objeto: una fuerza de 2 newtons que actúa durante 10 segundos o una fuerza de 3 newtons que actúa durante 6 segundos?

**Respuesta** El impulso más grande provoca el cambio más grande del momento. La primera fuerza genera un impulso de (2 newtons) (10 segundos) = 20 newtons-segundos; la segunda, de (3 newtons) (6 segundos) = 18 newtons-segundos. Por lo tanto, el primer impulso produce el mayor cambio en el momento.

Aunque el cambio en el momento puede ser igual, ciertos efectos dependen de la combinación específica de fuerza y tiempo. Suponga que tuviera que saltar desde la ventana de un segundo piso. ¿Preferiría saltar sobre una superficie de madera o de concreto? Por instinto, elegiría la de madera. Nuestra visión del mundo a partir del sentido común nos dice que es mejor saltar sobre una superficie que “cede”. Pero, ¿por qué es así?

Usted experimente el mismo cambio de momento con cualquier superficie; su momento cambia de un valor alto justo antes de que caiga a cero después. La diferencia es el tiempo necesario para que ocurra la colisión. Cuando una superficie cede, el tiempo de colisión es más prolongado. Por lo tanto, en concordancia, la fuerza neta promedio debe ser menor para producir el mismo impulso.

Debido a que nuestros huesos se rompen cuando las fuerzas son grandes, es importante la combinación específica de fuerza e intervalo de tiempo. Para un cambio de momento determinado, un tiempo de choque breve puede provocar fuerzas lo bastante grandes para romper huesos. Usted puede romperse una pierna al aterrizar sobre concreto. Por otra parte, el tiempo de choque con la madera puede ser lo bastante prolongado para evitar que causen algún daño las fuerzas en un cambio de momento grande.

Esta idea tiene muchas aplicaciones. Los tableros de instrumentos de los automóviles están cubiertos con espuma de caucho para aumentar el tiempo de choque durante un accidente. Los automóviles nuevos se construyen con parachoques que absorben los golpes para reducir el daño a los vehículos y con bolsas de aire para evitar lesiones de los pasajeros. Los barriles con agua o arena frente a las franjas intermedias de una carretera cumplen el mismo cometido. Quienes suplantaban a los actores famosos en escenas peligrosas son capaces de saltar desde alturas sorprendentes y caer en bolsas de aire grande que aumentan sus tiempo de choque al aterrizar. Los jugadores de vóleybol utilizan rodilleras acojinadas. Se utilizan pedazos pequeños de espuma plástica como material de empaque en las cajas para embarque con el fin de amortiguar los viajes llenos de baches.

Incluso sin una superficie suave, hemos aprendido cómo aumentar el tiempo de choque al saltar. En lugar de aterrizar con las rodillas rígidas, las doblamos inmediatamente después de chocar con el suelo. A continuación nos detenemos de manera gradual, en vez de hacerlo en forma abrupta.



Los automóviles modernos emplean bolsas de aire para proteger a los pasajeros al aumentar su tiempo de paro.



Un saltador con garrocha aterriza sobre colchones gruesos para aumentar el tiempo de choque y, por lo tanto, reducir la fuerza.



## Aterrizaje complicado: ¡Sin paracaídas!

Un ejemplo extremo de reducción de los efectos del cambio de momento ocurrió durante la Segunda Guerra Mundial. Un artillero de retaguardia de la Real Fuerza Aérea saltó (sin paracaídas) de un bombardero Lancaster incendiado que volaba a 5500 metros (18 000 pies). Alcanzó una rapidez terminal (no es un chiste) de más de 54 metros por segundo (120 mph), pero sobrevivió porque su cambio de momento ocurrió en una serie de pequeños impulsos con algunas ramas de un pino y un impulso final de 46 centímetros (18 pulgadas) de nieve. Debido a que esto tardó más tiempo que chocar directamente

contra el suelo, las fuerzas se redujeron. Milagrosamente, sólo sufrió rasguños y magulladuras.

El récord de supervivencia por una caída sin paracaídas lo posee Vesna Vulovic. Trabajaba como aeromoza en un DC-9 yugoslavo que estalló a 10 160 metros (33 330 pies) en 1972. Se rompió muchos huesos y estuvo hospitalizada durante 18 meses después de estar en coma durante 27 días.

Fuente: *Guinness Book of Records* (Nueva York: Bantam Books, 1999).

### FÍSICA | HÁGALO USTED MISMO

Juegue con un compañero a atrapar un huevo crudo. Después de cada lanzamiento exitoso, aléjese un paso de su compañero. ¿Cómo debe atrapar el huevo para evitar que se rompa?

## Conservación del momento lineal

### ✓ MATEMÁTICAS

Imagine que está parado sobre una patineta gigante que está en reposo (figura 5-1 [a]). ¿Cuál es el momento total de usted y la patineta? Debe ser cero, porque todo está en reposo. Ahora suponga que camina sobre la patineta. ¿Qué ocurre con la patineta? Cuando usted camina en una dirección, la patineta se mueve en la dirección contraria, como se ve en la figura 5-1 (b). Ocurre algo similar cuando usted dispara un rifle: la bala sale en una dirección, y el rifle recula en la dirección opuesta.

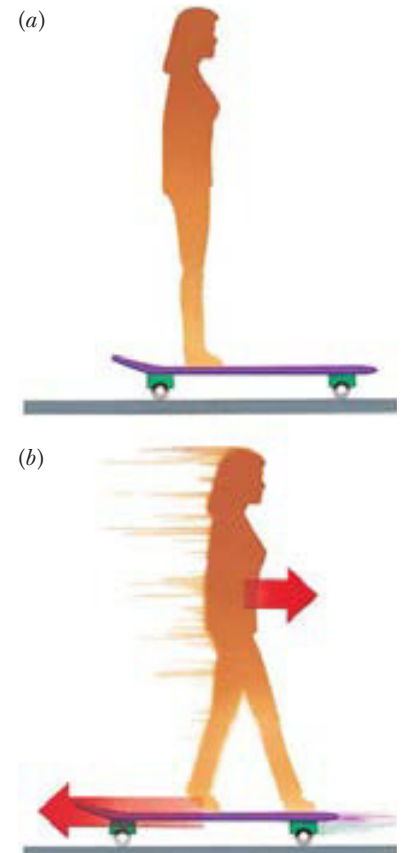
Estas situaciones se comprenden aunque no conozcamos los valores de las fuerzas —y, por lo tanto, los impulsos— relacionados. Primero, suponemos que ninguna fuerza externa neta actúa sobre los objetos. En particular, suponemos que no se consideran las fuerzas friccionales y que las otras fuerzas equilibran cualquier otra fuerza externa, como la gravedad.

Cuando usted camina sobre la patineta, ocurre una interacción. La fuerza que se ejerce sobre la patineta es, según la tercera ley de Newton, igual y opuesta a la fuerza que la patineta ejerce sobre usted. Los intervalos de tiempo durante los cuales estas fuerzas actúan sobre usted y la patineta deben ser iguales, porque no hay manera de que uno pueda tocar la otra sin también ser tocado. Debido a que usted y la patineta experimentan la misma fuerza durante el mismo intervalo, cada uno debe experimentar un impulso de la misma magnitud y, por lo tanto, el mismo cambio de magnitud en el momento.

Pero el impulso y el momento son vectores, de modo que sus direcciones son importantes. Como los impulsos están en direcciones opuestas, el cambio en los momentos también ocurre en direcciones opuestas. Por lo tanto, la suma de su momento y el de la patineta todavía es cero. En otras palabras, aunque usted y la patineta se muevan y, de manera individual, tengan momentos diferentes de cero, el momento total sigue siendo cero. Observe que llegamos a esta conclusión sin considerar los detalles de las fuerzas relacionadas. Esto se aplica a todas las fuerzas entre usted y la patineta.

**Pregunta** Suponga que la patineta tiene la mitad de la masa de usted y que usted camina a una velocidad de 1 metro por segundo hacia la izquierda. Describa el movimiento de la patineta.

**Respuesta** La patineta debe tener el mismo momento, pero en la dirección opuesta. Debido a que posee la mitad de la masa, su rapidez debe ser el doble. Por lo tanto, su velocidad debe ser 2 metros por segundo hacia la derecha.



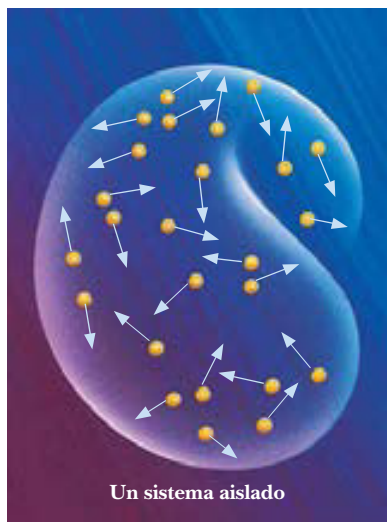
**Figura 5-1** (a) Una persona y una patineta en reposo tienen un momento cero. (b) Cuando la persona camina hacia la derecha, la patineta se mueve hacia la izquierda, lo que mantiene el momento total en cero.

Debido a que los cambios en los momentos de los dos objetos son iguales en magnitud y opuestos en dirección, no cambia el valor del momento total. Decimos que el momento total se **conserva**.

Podemos generalizar estos hallazgos. Cada vez que una fuerza actúa sobre un objeto, debe haber cuando menos otro objeto relacionado. Este otro objeto puede estar en contacto real con el primero, o puede interactuar a una distancia de 150 millones de kilómetros, pero está allí. Si ampliamos nuestra consideración para incluir todos los objetos que interactúan, llegamos a una nueva idea.

Considere los objetos como un sistema. Cada vez que una fuerza neta actúa sobre el sistema desde el exterior (es decir, el sistema está aislado, o cerrado), las fuerzas relacionadas sólo actúan entre los objetos dentro del sistema. Como una consecuencia de la tercera ley de Newton, el momento total del sistema permanece constante. Esta generalización se conoce como la ley de la **conservación del momento lineal**.

conservación del momento lineal ➤



El momento lineal total de un sistema aislado se conserva. Un sistema está aislado si una fuerza externa neta actúa sobre él.

El momento lineal total de un sistema no cambia si no existe una fuerza externa neta.

Esto significa que si usted suma todos los momentos ahora y se aleja por un rato, cuando regresa y vuelve a sumar los momentos, obtendrá el mismo número, incluso si los objetos chocaban entre sí durante el tiempo que se fue. En la práctica, aplicamos la conservación del momento a los sistemas cuando la fuerza neta externa es cero o se pueden dejar de considerar los efectos de las fuerzas.

Usted experimenta de manera directa la conservación del momento cuando trata de dar un paso desde una embarcación pequeña hacia un muelle. Cuando da el paso hacia el muelle, la embarcación se aleja del muelle, y usted puede caer al agua. Aunque ocurre el mismo efecto cuando desembarcamos de un transatlántico, la enorme masa de éste reduce la rapidez que usted aplica al dar el paso. Una masa grande requiere un cambio de velocidad pequeño para experimentar el mismo cambio en el momento.

## SOLUCIÓN | Momento



Calculemos la reculada de un rifle. Una bala de 150 granos para un rifle 30-06 tiene una masa  $m$  de 0.01 kg y una velocidad de salida  $v$  de 900 m/s (2000 mph). Por lo tanto, la magnitud del momento  $p$  de la bala es

$$p = mv = (0.01 \text{ kg})(900 \text{ m/s}) = 9 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$$

Debido a que el momento total de la bala y el rifle al principio era cero, la conservación del momento requiere que el rifle recule con un momento igual en dirección opuesta. Si la masa  $M$  del rifle es 4.5 kg, la rapidez  $V$  de su reculada se obtiene mediante

$$V = \frac{p}{M} = \frac{9 \text{ kg} \cdot \text{m/s}}{4.5 \text{ kg}} = 2 \text{ m/s}$$

Si usted no sostiene el rifle cómodamente contra su hombro, el rifle golpeará su hombro a esta velocidad (¡4.5 mph!) y lo lastimará.

**Pregunta** ¿Por qué sostener el rifle cómodamente reduce los efectos de su reculada?

**Respuesta** Sostener el rifle cómodamente aumenta la masa de la reculada (la masa de usted se añade a la del rifle) y eso reduce la rapidez de la reculada.

Aunque no lo percibimos, ocurre el mismo efecto cuando caminamos. Nuestro momento cambia; por lo tanto, el momento de algo más debe cambiar en la dirección opuesta. Ese algo más es la Tierra. Debido a su enorme masa, la rapidez de la Tierra sólo necesita cambiar una magnitud infinitesimal para adquirir el cambio de momento necesario.

## Colisiones

Los objetos que interactúan inicialmente no necesitan estar en reposo para que sea válida la conservación del momento. Suponga que una pelota que se mueve hacia la izquierda con cierto momento choca de frente con una pelota idéntica que se mueve hacia la derecha con un momento de la misma magnitud. Antes de la colisión, los dos momentos son iguales en magnitud, pero opuestos en dirección, y debido a que son vectores, su suma es cero.

Después de la colisión, las pelotas se separan con momentos iguales en direcciones opuestas. Debido a que las masas de las pelotas son iguales, la rapidez que tienen después de la colisión también es igual. Esta rapidez depende del tipo de pelota. Puede ser tan intensa como la rapidez original en el caso de las bolas de billar, bastante menor en el caso de bolas de plomo, o incluso cero si las pelotas están hechas de masilla suave y quedan adheridas. En todos los casos, los dos momentos tienen la misma magnitud y están en direcciones opuestas. El momento total sigue siendo cero.

### Razonamiento defectuoso



Una pregunta de un examen final dice “¿A qué nos referimos cuando afirmamos que el momento total se conserva durante una colisión?”. Se obtienen las dos respuestas siguientes:

**Respuesta 1:** El momento total del sistema permanece igual antes y después de la colisión.

**Respuesta 2:** El momento total del sistema es cero antes y después de la colisión.

**¿Con cuál respuesta (si es el caso) está usted de acuerdo?**

**Respuesta** Si bien hemos considerado varios ejemplos en los cuales el momento total del sistema es cero, este no es el caso más general. El momento de un sistema puede tener cualquier magnitud y cualquier dirección antes de la colisión. Si se conserva el momento, el momento del sistema siempre tiene la misma magnitud y dirección después de la colisión. Por lo tanto, la respuesta 1 es correcta. Este es un principio muy poderoso debido a la palabra *siempre*.

Un furgón que viaja a 10 metros por segundo se acerca a una fila de cuatro furgones idénticos que están inmóviles sobre una vía. El furgón en movimiento choca y se engancha con los que están inmóviles, y los cinco furgones avanzan juntos por la vía. ¿Cuál es la rapidez final de los cinco furgones inmediatamente después de la colisión?

La conservación del momento nos dice que el momento total debe ser igual antes y después de la colisión. Antes de la colisión, un furgón avanza a 10 metros por segundo. Después de la colisión, cinco furgones idénticos se mueven con una rapidez final común. Debido a que la magnitud de la masa que se mueve aumentó por un factor de cinco, la rapidez debe disminuir por un factor de cinco. Los furgones tendrán una rapidez final de 2 metros por segundo. Observe que no tuvimos que conocer la masa de cada furgón, sólo que todos tenían la misma masa.

Podemos utilizar la conservación del momento para medir la rapidez de objetos que se mueven veloces. Por ejemplo, piense en determinar la rapidez de una



**Figura 5-2** Determinación de la rapidez de una flecha por medio de la conservación del momento. El momento del bloque y la flecha después de la colisión es igual al momento de la flecha antes de la colisión.

flecha disparada desde un arco. Primero elegimos un blanco móvil y grande: un bloque de madera sostenido por cuerdas. Antes que la flecha golpee el bloque (figura 5-2[a]), el momento total del sistema es igual al de la flecha (el bloque está en reposo). Después que la flecha se incrusta en el bloque (figura 5-2[b]), los dos se mueven con una rapidez menor y más fácil de medir. El momento final del bloque y la flecha justo después de la colisión es igual al momento inicial de la flecha. Al conocer las masas, es posible determinar la rapidez inicial de la flecha.

Uno de los autores ofrece un ejemplo de un objeto pequeño que se mueve con rapidez y choca con un objeto de mayor tamaño, al acostarse sobre una cama de clavos, como se aprecia en la figura 5-3. (Por sí solo este hecho puede parecer una acción notable. Sin embargo, el autor no tiene que ser un faquir con poderes místicos, porque sabe que 500 clavos soportan el peso de la parte superior de su cuerpo, de modo que cada clavo sólo tiene que soportar 0.4 libras. Se requiere aproximadamente 1 libra de fuerza para que el clavo rasgue la piel.) Una vez sobre la cama de clavos, coloca un tablero sobre su pecho y encima pone un bloque de concreto, igual que en la figura 5-3 (a). Después pide a una estudiante que rompa el bloque de concreto con un marro (figura 5-3[b]).

Esta escenificación ejemplifica varias ideas. El tablero sobre el pecho dispersa el golpe, de modo que es pequeña la fuerza sobre cualquier parte del pecho. Debido a que el marro tarda en atravesar el bloque de concreto, aumenta el tiempo de colisión, y, por lo tanto, la fuerza disminuye todavía más. Por último, se conserva el momento en la colisión, pero la masa mucho más grande del autor asegura que la velocidad impartida a su cuerpo será mucho menor que la velocidad del marro. Esto significa que su cuerpo es impulsado lentamente sobre los clavos, y que es mínima la fuerza adicional que ejerce cada clavo para detener su cuerpo. Por lo tanto, la espalda del autor no sufre daños, y él obtiene la admiración de sus estudiantes sin sacrificar su cuerpo.



**Figura 5-3** El autor hace una demostración de física al permitir que una estudiante rompa un bloque de concreto sobre su pecho mientras está acostado sobre una cama de clavos.



## Investigación de accidentes

Los investigadores de accidentes emplean la conservación del momento para reconstruir accidentes con automóviles. No se pueden aplicar las leyes de Newton para analizar la colisión misma porque no conocemos las fuerzas detalladas relacionadas. Sin embargo, la conservación del momento lineal nos dice que, sin tomar en cuenta los detalles del choque, el momento total de los dos vehículos permanece igual. El momento total inmediatamente antes del choque debe ser igual al que ocurre inmediatamente después. Debido a que el impacto sucede durante un tiempo muy breve, normalmente ignoramos los efectos friccionales con el pavimento, y la colisión se trata como si no hubiera fuerzas externas.

Como ejemplo, considere una colisión de alcance. Suponga que el carro de adelante estaba detenido y que los dos automóviles engancharon sus parachoques con el impacto. A partir del análisis de la distancia de las huellas hechas *después* de la colisión y del tipo de superficie, es posible calcular el momento total de los dos vehículos justo antes de la colisión. (Veremos cómo hacer esto en el capítulo 6; por ahora, suponga que conocemos su momento total.) Como uno de los autos estaba inmóvil, el momento total antes del choque se debe al vehículo en movimiento. Al saber que el momento es el producto de la masa y la velocidad ( $mv$ ), podemos calcular la rapidez del automóvil justo antes de la colisión. Por lo tanto, podemos determinar si el conductor aceleraba.



© Ego/Shutterstock

La rapidez inicial de estos automóviles se puede determinar al analizar la colisión.

### SOLUCIÓN | Una colisión



Apliquemos la conservación del momento para analizar esta colisión. Por sencillez, supongamos que cada automóvil tiene una masa de 1000 kg (una tonelada métrica) y que los vehículos viajaban en línea recta. Suponga además que hemos determinado que la rapidez de los dos automóviles que quedaron atorados era 10 m/s (alrededor de 22 mph) después del choque. El momento total después del choque era igual a la masa total de los dos automóviles multiplicada por su rapidez combinada:

$$p = (m_1 + m_2)v = (1000 \text{ kg} + 1000 \text{ kg})(10 \text{ m/s}) = 20\,000 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$$

Pero debido a que se conservó el momento, éste también era el valor antes del choque. Sin embargo, antes del choque sólo un vehículo estaba en movimiento. De modo que si dividimos este momento total entre la masa del automóvil en movimiento, obtenemos su rapidez:

$$v = \frac{p}{m} = \frac{20\,000 \text{ kg} \cdot \text{m/s}}{1000 \text{ kg}} = 20 \text{ m/s}$$

Por lo tanto, el automóvil viajaba a 20 m/s (aproximadamente 45 mph) en el momento del accidente.

**Pregunta** Si el vehículo detenido no estaba inmóvil, sino avanzaba lentamente en dirección del momento total, ¿cómo cambiaría la rapidez calculada del otro automóvil si el momento final se conserva igual?

**Respuesta** Debido a que el vehículo en movimiento explica una parte del momento total antes de la colisión, el otro automóvil tenía menos momento inicial y por lo tanto, una rapidez más baja.

La suposición de que los automóviles se atoran después de la colisión simplifica el análisis, pero no es indispensable. La conservación del momento se aplica a todos los tipos de colisiones. Incluso si no se atoran los dos vehículos, es posible determinar la velocidad original si se puede obtener la velocidad de cada automóvil justo antes de la colisión. Los autos ni siquiera tienen que avanzar en la misma



dirección inicial. Si los autos chocan de frente, debemos tener cuidado de incluir las direcciones de los momentos, pero no cambia el procedimiento de igualar los momentos totales antes y después del accidente.

## Razonamiento defectuoso



Dos estudiantes discuten acerca de una colisión entre dos planeadores en una pista de vuelo. El planeador A golpea al planeador B, el cual es el doble de grande y al principio está inmóvil.

**José:** “Considero que el planeador B tendrá la rapidez final más grande cuando la rapidez final del planeador A sea cero. En este caso, el planeador A traslada *todo* su momento al planeador B.”

**Shaq:** “Olvidas que el momento es un vector. Si el planeador A rebota hacia atrás durante la colisión, experimenta un cambio mayor en el momento que si se detiene. El planeador B siempre debe experimentar el mismo cambio en el momento (pero en dirección opuesta) que el planeador A, de modo que tendría una rapidez final más alta en este caso.”

**¿Con cuál estudiante (si es el caso) coincide usted?**

**Respuesta** Shaq prestaba atención en la clase. Cualquiera que posea tarjetas de crédito sabe que es posible perder más que todo lo que tiene. Si al principio el planeador A se movía a 3 metros por segundo en la dirección positiva y se detiene, su cambio en la velocidad es  $-3$  metros por segundo. Por otra parte, si el mismo planeador rebota con una velocidad final de  $-2$  metros por segundo, el cambio en su velocidad es  $-5$  metros por segundo. Debido a que el cambio en el momento es sólo la masa por el cambio en la velocidad, el rebote produce un cambio de momento mayor.



© Photodisc Green/Getty Images

El estudio de la física en una sala de billar mejora sus conocimientos de física y su juego.

Como el momento es un vector, este procedimiento también se puede utilizar para comprender las colisiones en dos dimensiones como las que ocurren cuando los automóviles chocan mientras viajan en ángulos rectos entre sí. Debe conservarse el momento del vector total.

## FÍSICA | HÁGALO USTED MISMO

Visite una sala de billar e intente los siguientes experimentos con el momento. En cada situación, pregúntese si se conserva el momento. (Mantenga las cosas simples al no dar a las bolas ningún giro adicional.)

- Una bola de billar golpea de frente a una bola inmóvil.
- Una bola de billar golpea a otras dos colocadas una tras la otra.
- Ocurre una colisión de frente entre bolas de billar con velocidades iguales, pero direcciones opuestas.
- Una bola con una masa más pequeña (por ejemplo, una bola de *snooker*) choca de frente con una bola de billar inmóvil.
- Una bola de billar choca de frente con una bola inmóvil que tiene una masa más pequeña.
- Una bola de billar experimenta un golpe accidental con una que está inmóvil, de modo que las dos bolas ya no viajan en línea recta.



© David Rogers

Durante un vuelo, las hojas de la hélice de un Cessna 172 impulsan el aire hacia atrás para avanzar.

## Aviones, globos y cohetes

La conservación del momento también se aplica al vuelo. Si sólo analizamos el avión, es seguro que no se conserva el momento. Tiene un momento cero antes del despegue, y su momento cambia muchas veces durante un vuelo.

## NOETHER La gramática de la física

Al ingresar en la academia Platón, se inició a la novata de las ciencias con “Que no ingrese aquí nadie que no sepa geometría”. Las matemáticas siempre han sido el idioma de las ciencias físicas. En los siglos recientes los estudiantes de ciencias a veces han sentido frustración por la desconcertante colección de símbolos y manipulaciones exclusivos de las matemáticas: para comunicar las afirmaciones más generales para una serie de fenómenos, se ha vuelto necesario declarar las reglas y las teorías en términos matemáticos. De modo que los estudiantes de ciencias han experimentado estudios de matemáticas cada vez más complejos, sólo para dominar la gramática básica de las ciencias.

Durante siglos fue casi imposible para la mitad de la raza humana —las mujeres— aspirar a una vida en la ciencias o las matemáticas. Por suerte, eso cambió de manera dramática en el siglo xx. Un ejemplo de intensa lucha, brillantez absoluta y determinación se encuentra en la vida de Amalie Emmy Noether (1882-1935). Provenía de una familia de padres y hermanos distinguidos. Asistió a la Erlangen University, en donde su padre era matemático investigador, y luego a Göttingen, pero no se le permitió inscribirse de manera formal. (En esa época, las mujeres alemanas no hacían eso.) La calidad de su trabajo generó fuertes elogios, y finalmente obtuvo una licenciatura cum laude de Erlangen, en 1907.

Ya había atraído la atención de las mentes más sutiles de Alemania. Su trabajo sobre constantes algebraicas precipitó una invitación de David Hilbert para enseñar en Göttingen en 1915. Ahí, produjo algunas elegantes fórmulas para la teoría general de la



Amalie Emmy Noether

© Science Photo Library/Photostock

relatividad de Albert Einstein. Pero nunca fue uno de los “muchachos”. Su título oficial era profesora asociada no oficial. Con todo, fue una instructora de álgebra extensamente elogiada y recompensada.

Su trabajo sobre las relaciones entre las simetrías del espacio y el tiempo y las leyes de la conservación se utiliza mucho en la física teórica moderna: Si las ecuaciones de la teoría no contienen de manera explícita el tiempo, la energía se conserva. Si la teoría no depende de traslaciones en el espacio, se conserva el momento lineal. Y, asimismo, si la teoría no depende de rotaciones del espacio, se conserva el momento angular.

Cuando Adolf Hitler llegó al poder en 1933, Noether, igual que muchos judíos, fue expulsada. Emigró a Estados Unidos, donde se convirtió en catedrática regular en el Bryn Mawr College en Pensilvania. También estuvo asociada con Albert Einstein en su Instituto de Estudios Avanzados en Princeton.

Su inesperado y prematuro fallecimiento ocurrió durante un procedimiento quirúrgico rutinario. En la actualidad se le considera la matemática más brillante en la historia de esa disciplina.

—Pierce C. Mullen, historiador y autor

Fuentes: Auguste Dick, *Emmy Noether, 1882-1935*, trad. H. I. Blocher (Boston: Birkhaeser, 1981). Para un estudio general de las mujeres en las ciencias, consulte Merelene F. Rayner-Canham, *A Devotion to Their Science: Pioneer Women of Radioactivity* (Montreal: McGill-Queen's University Press, 1997); y Evelyn Fox Keller, *Reflections on Gender and Science* (New Haven, Conn.: Yale University Press, 1985).

Pero si consideramos el sistema del avión más la atmósfera, el momento se conserva. En el caso de un avión impulsado con una hélice, ocurre una interacción cuando la hélice impulsa las moléculas del aire circundante, lo cual aumenta sus momentos en dirección hacia atrás. Esto es acompañado por un cambio igual del momento del avión en dirección hacia adelante. Si ignoramos la resistencia del aire, el avión obtendría continuamente momento en la dirección hacia adelante.

**Pregunta** ¿Por qué el avión no aumenta su momento continuamente?

**Respuesta** Cuando el avión se abre paso por el aire, golpea las moléculas de aire, y las impulsa en dirección hacia adelante. Esto produce impulsos sobre el avión en dirección hacia atrás. En un vuelo nivelado recto a una velocidad constante, los dos efectos se cancelan.

Suelte un globo inflado, y saldrá volando por la habitación. ¿Esto es similar al avión impulsado por hélices? No, porque las moléculas en la atmósfera no son necesarias. Las moléculas de aire en el globo salen precipitadamente y adquieren un cambio en el momento hacia la parte posterior. Esto es acompañado por un cambio igual en el momento del globo en dirección hacia adelante. Las moléculas de aire no necesitan impulsar nada; el globo puede volar en el vacío.

Esto también se aplica a los cohetes y explica por qué se pueden utilizar en un vuelo espacial. Los cohetes adquieren cambios en el momento en dirección hacia adelante al expeler gases a velocidades muy altas en dirección hacia atrás. Al orientar la dirección de los gases expelidos, los cambios de momento resultantes también sirven para modificar la dirección del cohete. Una interesante demostración en clase de esto se suele hacer con un extintor de incendios modificado como la fuente de gas de alta velocidad, como se observa en la figura 5-4.



© David Rogers

**Figura 5-4** Un extintor de incendios proporciona el impulso para un cohete en un pasillo. ¿Por qué la persona se mueve hacia atrás?

## FÍSICA | HÁGALO USTED MISMO

Haga funcionar un cohete del modelo común (del que encuentra en las jugueterías) al llenarlo con agua y luego bombearla con aire. Ponga un pedazo de cartón tras el cohete antes de dispararlo. Observe a dónde va el agua. ¿Qué ocurre si no utiliza nada de agua?

Los aviones a reacción están en algún punto entre los aviones impulsados con hélice y los cohetes. Los motores a reacción toman el aire de la atmósfera, lo calientan a altas temperaturas, y luego lo expelen a alta velocidad por su parte posterior. Los gases de rápido movimiento imparten un momento al avión al salir del motor. Aunque los gases no presionan la atmósfera, los aviones a reacción necesitan la atmósfera como fuente de oxígeno para la combustión.

## Resumen

El momento de un objeto cambia si se modifican su velocidad o su masa. Éste también se produce mediante un impulso, una fuerza neta que actúa sobre el objeto durante cierto tiempo  $F\Delta t$ . El impulso es una cantidad de vector con la misma dirección que la fuerza; esta es también la dirección del cambio en el momento. Existen muchas maneras de producir un cambio específico en el momento, al modificar la intensidad de la fuerza y el intervalo de tiempo durante el cual actúa.

El momento de un sistema es la suma de vectores de todos los momentos de las partículas del sistema. Suponiendo que no existe una fuerza externa neta que actúe sobre el sistema, el momento total no cambia. Esta generalización se conoce como la ley de la conservación del momento lineal. La conservación del momento se aplica a muchos sistemas, desde globos hasta bolas de billar.

## Capítulo 5



## Revisión

La regla, conocida como conservación del momento lineal, es válida en ambas direcciones del tiempo. Si conocemos las velocidades y las masas de todos los objetos en cualquier momento, podemos retroceder las ecuaciones para ver de dónde provienen los objetos, y podemos avanzarlas para ver hacia dónde se dirigen.

## TÉRMINOS IMPORTANTES

**conservación del momento lineal:** Si la fuerza externa neta sobre un sistema es cero, no cambia el momento lineal total del sistema.

**conservado:** Este término se utiliza en la física para indicar que no cambia un número asociado con una propiedad física; es una constante.

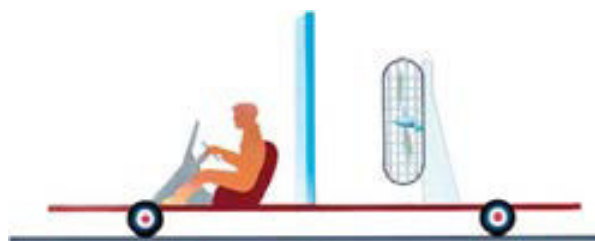
**impulso:** El producto de la fuerza y el tiempo durante el cual actúa,  $F\Delta t$ . Esta cantidad de vector es igual al cambio en el momento.

**momento lineal:** Una cantidad de vector igual al producto de la masa de un objeto y su velocidad,  $\mathbf{p} = m\mathbf{v}$ .

## PREGUNTAS CONCEPTUALES

1. En la física, ¿qué damos a entender al decir que algo se conserva?
2. ¿Bajo cuáles condiciones se conserva la masa?
3. Dos carritos idénticos con la misma rapidez chocan frente a frente y quedan adheridos. Sydney argumenta, “El momento para este sistema se conserva porque el momento del primer carrito cancela el momento del segundo para generar cero. Toby responde, “No, el momento se conserva porque es cero antes y después de la colisión”. ¿Con cuál estudiante coincide usted y por qué?
4. Un carrito de 2 kilogramos que se mueve a 6 metros por segundo golpea un carrito de 2 kilogramos detenido. Los dos se mueven juntos a 3 metros por segundo. Lee afirma que “En esta colisión se conserva el momento porque el momento del sistema tiene el mismo valor antes y después de la colisión”. Jackie lo contradice con

- “El momento del sistema antes de la colisión es de 12 kilogramos-metros por segundo, no cero, de modo que el momento no se conserva”. ¿Con cuál estudiante coincide usted y por qué?
- ¿Por qué cuesta trabajo detener los superpetroleros? ¿Y hacer que den vuelta?
  - ¿Qué tiene un momento más pronunciado, un camión con cemento estacionado o un niño sobre una patineta que avanza lentamente por la calle? ¿Por qué?
  - Exponga la segunda ley de Newton en términos del momento.
  - Explique la primera ley de Newton en términos del momento.
  - ¿Cómo el recubrimiento (o las bolsas de aire) en las suelas de las zapatillas para correr reducen las fuerzas sobre sus piernas? Explique su respuesta en términos del impulso y el momento.
  - ¿Cómo el recubrimiento en los tableros de mandos de los automóviles los hace más seguros? Explique su respuesta en términos del impulso y el momento.
  - Un astronauta que entrena en los Cráteres de la Luna en Idaho salta desde una plataforma con todo su equipo espacial y golpea la superficie a 5 metros por segundo. Si después, en la Luna, el astronauta salta desde el vehículo de aterrizaje y golpea la superficie con la misma rapidez, ¿el impulso será mayor, menor, o igual que en la Tierra? ¿Por qué?
  - ¿Por qué es menos riesgoso para su salud esquiar contra un muro de nieve espesa que contra un muro de ladrillos? Suponga que en ambos casos usted tiene la misma rapidez inicial y llega a un paro total. Explique su respuesta en términos del impulso y el momento.
  - Suponga que un amigo salta desde el techo del estacionamiento y aterriza sobre el suelo. ¿Cómo se comparan los impulsos que el terreno ejerce sobre su amigo si el aterrizaje es sobre césped o sobre concreto?
  - ¿Por qué un huevo se rompe cuando se deja caer en el suelo de mosaicos de la cocina, pero no cuando aterriza sobre la alfombra de la sala?
  - Un saco de harina de 2 kilogramos cae del mostrador y aterriza sobre el piso. Justo antes de chocar con el suelo, el saco tiene una rapidez de 4 metros por segundo. ¿Qué impulso (magnitud y dirección) ejerce el piso sobre el saco?
  - Una pelota de goma de 2 kilogramos resbala del mostrador y cae al suelo. Justo antes de chocar contra el piso, la pelota tiene una rapidez de 4 metros por segundo. Si la pelota rebota, ¿la magnitud del impulso que el piso ejerce sobre ella es menor, igual, o mayor que 8 kilogramos-metros por segundo? ¿Por qué?
  - Greg y Jeff caminan por la acera cuando macetas idénticas caen de una ventana en lo alto. Una maceta aterriza sobre la cabeza de Greg y no rebota, mientras que la otra aterriza sobre la cabeza de Jeff y rebota. ¿Cuál de las macetas experimenta el mayor impulso? Suponiendo que el tiempo de colisión es igual para ambos casos, ¿quién termina con el peor dolor de cabeza? Explique.
  - Se dejan caer dos pelotas al suelo desde la misma altura. Las pelotas están hechas de diferentes tipos de hule, de modo que una rebota casi a la misma altura, mientras la otra no rebota en absoluto. Suponiendo que ambas pelotas tienen la misma masa, ¿cuál de ellas experimenta el mayor impulso al chocar contra el suelo? ¿Por qué?
  - Explique por qué los guantes de boxeo de 12 onzas utilizados en las peleas de aficionados lastiman menos que los guantes de 6 onzas utilizados en las peleas profesionales.
  - Usted patea 15 metros una pelota de fútbol soccer sin lastimar su pie. Después infla la pelota hasta que está realmente dura (el aire adicional no cambia significativamente la masa de la pelota) y vuelve a patearla 15 metros. Esta vez le duele mucho el pie. Mediante el concepto de impulso, explique por qué se lastimó más en el segundo caso.
  - Dos personas juegan a atrapar una pelota. Describa los cambios del momento que ocurren para la pelota, las personas, y la Tierra. ¿En todas las ocasiones se conserva el momento?
  - Describa los cambios del momento que ocurren cuando usted hace un regate sobre un jugador de baloncesto.
  - ¿Qué produce el cambio de momento más grande: una fuerza de 3 newtons que actúa durante 5 segundos o una fuerza de 4 newtons que actúa durante 4 segundos? Explique.
  - ¿Qué produce el impulso más grande: una fuerza de 3 newtons que actúa durante 3 segundos o una fuerza de 4 newtons que actúa durante 2 segundos? Explique.
  - ¿Cómo explica la reculada que ocurre cuando se dispara un rifle?
  - ¿Cómo diseñaría un rifle para que no reculara?
  - A Young Bill le encanta volar cohetes a escala. No obstante, en su proyecto actual, le preocupa que una vez que el cohete deje la fase de lanzamiento no tendrá nada sobre lo cual impulsarse. Para reparar esto, Bill sujeta al cohete, directamente bajo el motor, una placa de aluminio que viajará con el cohete. Explique por qué Bill se sentirá muy decepcionado con el resultado.
  - Un estudiante que hace poco estudió la ley de la conservación del momento lineal decide impulsar un cochecito por medio de instalar un ventilador que sople sobre un tablero, igual que en la figura. Esta idea no funciona muy bien. ¿Por qué?



- Mientras una pelota cae hacia el piso, acelera de manera continua y, por lo tanto, aumenta su momento. ¿Por qué ésta no es una violación de la ley de la conservación del momento lineal?
- Una bola de salida golpea una bola ocho inmóvil sobre una mesa de billar. ¿Para cuál de los sistemas siguientes existe un cambio de momento durante la colisión? Explique por qué.
  - La bola de salida.
  - La bola ocho.
  - Ambas bolas.



31. Dos objetos idénticos que se mueven con la misma rapidez chocan entre sí, como se aprecia en la figura. Si los dos objetos quedan adheridos después de la colisión, ¿se moverán hacia la izquierda, hacia la derecha, o nada en absoluto? Justifique su respuesta con el concepto del momento lineal.



32. Un objeto con una masa  $m$  y un objeto con una masa  $3m$ , que se desplazan con la misma rapidez, chocan entre sí igual que en la figura. Si los dos objetos se adhieren después de la colisión, ¿se moverán a la izquierda, a la derecha, o nada en absoluto? Justifique su respuesta con el concepto del momento lineal.



33. Un objeto con una masa  $m$  y un objeto con una masa  $3m$ , que se desplazan con la misma rapidez, chocan entre sí como en la figura. El objeto más ligero al principio se mueve con el doble de rapidez que el más pesado. Si los dos objetos se adhieren después de la colisión, ¿se moverán a la izquierda, a la derecha, o nada en absoluto? Justifique su respuesta con el concepto del momento lineal.

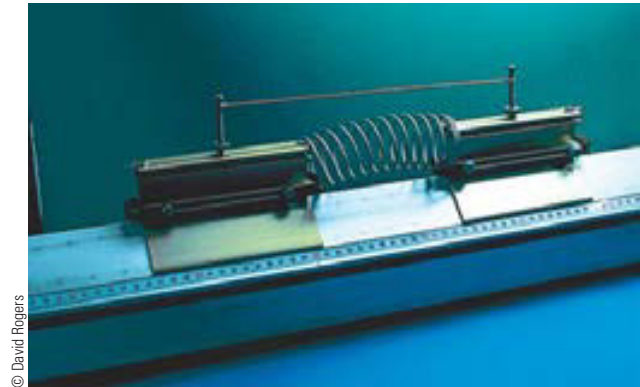


34. Dos objetos idénticos, uno que se mueve con el doble de rapidez que el otro, chocan entre sí como se aprecia en la figura. Si los dos objetos se adhieren después de la colisión, ¿se moverán a la izquierda, a la derecha, o nada en absoluto? Justifique su respuesta con el concepto del momento lineal.



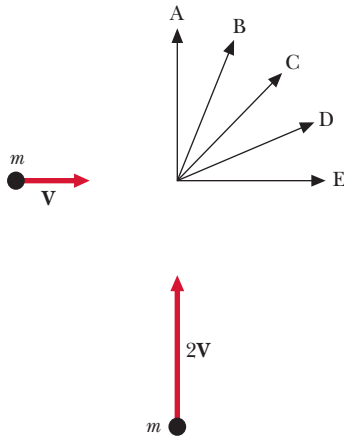
35. Su maestro corre por el frente del aula con un momento de 250 kilogramos-metros por segundo y por error salta sobre una patineta gigante. Al principio la patineta está en reposo y tiene una masa igual a la de su maestro. Si usted ignora la fricción con el piso, ¿cuál es el momento total de su maestro y la patineta antes y después del aterrizaje?
36. Un amigo está parado sobre una patineta gigante que al principio está en reposo. Si usted no considera los efectos friccionales con el piso, ¿cuál es el momento de la patineta si su amigo camina hacia la derecha con un momento de 150 kilogramos-metros por segundo? ¿Cuál es el momento del sistema patineta-persona?
37. La figura muestra dos deslizadores para pista de aire unidos con una cuerda. Un resorte está apretadamente comprimido entre los deslizadores y se suelta al quemarse la

cuerda. La masa del deslizador de la izquierda es el doble que la del deslizador de la derecha, y al principio está en reposo. ¿Cuál es el momento total de ambos deslizadores después de soltar el resorte?

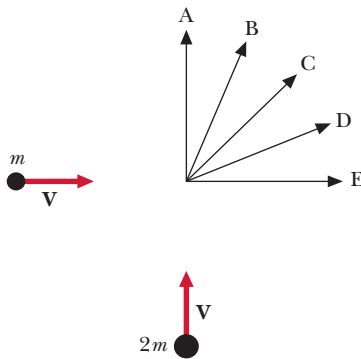


38. Si el deslizador de la derecha de la pregunta 37 tiene una rapidez de 2 metros por segundo después que se suelta el resorte, ¿con cuánta rapidez se moverá el deslizador de la izquierda?
39. Explique por qué las personas que intentan saltar desde una embarcación hacia un muelle llegan a caer al agua.
40. Un astronauta en un transbordador espacial se empuja desde una pared para flotar a través de la habitación. ¿Qué efectos tiene esto (si es el caso) sobre el movimiento del transbordador?
41. A veces, una estrella "muere" en una enorme explosión, conocida como supernova. ¿Qué le sucede al momento total de dicha estrella?
- ▲ 42. Durante una celebración del Día de la Independencia, se lanza un cohete desde el suelo, el cual explota en la parte superior de su arco. Si ignoramos la resistencia del aire, ¿qué sucede con el momento total de todos los fragmentos del cohete?
43. Un astronauta flota en el centro de una estación espacial sin ningún movimiento de translación en relación con la estación. ¿Es posible que el astronauta se mueva hacia el piso? Explique por qué sí o por qué no.
44. Durante su último viaje, Al el astronauta encuentra una enorme bolsa con monedas de oro flotando en el espacio. Rápidamente detiene su nave, se pone su traje espacial, ata una cuerda a su cintura, y se impulsa en dirección al oro. Pero surgen problemas; cuando se estira para asir la bolsa del oro, la cuerda se rompe. Imagine un modo para que Al regrese a su nave espacial antes que se agote el oxígeno. Aunque lo que más importa a Al es su vida, quien resuelva el problema creativo puede hacer que Al regrese vivo y con dinero.
45. Dos objetos idénticos, uno que se mueve al norte, y otro que se mueve al este, chocan y se adhieren entre sí. Si el objeto que iba al norte al principio se movía con el doble de rapidez que el que iba al este, ¿cuál de las trayectorias indicadas representa el movimiento final más probable del par? Justifique su respuesta con el concepto del momento lineal.

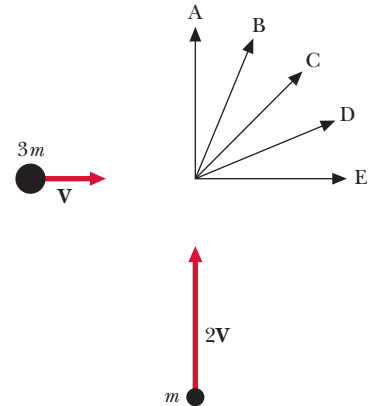




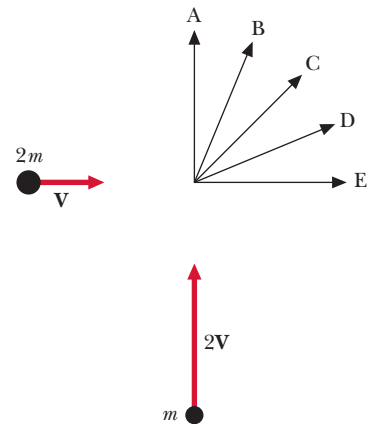
46. Dos objetos con la misma rapidez, uno que se desplaza al norte y el otro al este, chocan y quedan adheridos. Si el objeto que iba al norte tiene el doble de masa que el objeto que iba al este, ¿cuál de las trayectorias indicadas representa el movimiento final más probable del par? Justifique su respuesta con el concepto del momento lineal.



47. Dos objetos, uno que se mueve hacia el norte y el otro hacia el este, chocan y se adhieren entre sí. Si el objeto que iba al este tiene el triple de la masa y al principio se movía con la mitad de la rapidez que el objeto que iba al norte, ¿cuál de las trayectorias indicadas representa el movimiento final más probable del par? Justifique su respuesta con el concepto del momento lineal.



48. Dos objetos, uno que se mueve hacia el norte y el otro hacia el este, chocan y se adhieren entre sí. Si el objeto que iba al este tiene el doble de la masa y al principio se movía con la mitad de la rapidez que el objeto que iba al norte, ¿cuál de las trayectorias indicadas representa el movimiento final más probable del par? Justifique su respuesta con el concepto del momento lineal.



## EJERCICIOS

1. ¿Cuál es el momento de un automóvil deportivo de 1200 kg que baja por el camino con una rapidez de 30 m/s?
2. ¿Un ala defensivo que tiene una masa de 120 kg y que corre a 6 m/s tiene un momento más grande o más pequeño que un corredor con una masa de 100 kg y que corre a 8 m/s?
3. ¿Con cuánta rapidez tendría que lanzar una pelota de béisbol ( $m = 145$  g) para darle el mismo momento que una bala de 10 g que viaja a 900 m/s?
4. ¿Qué tan rápido (en mph) tendría que viajar una persona con una masa de 80 kg para tener el mismo momento

que un camión de 18 ruedas ( $m = 24\,000$  kg) que avanza a 1 mph?

5. ¿Qué fuerza neta promedio se necesita para acelerar un automóvil de 150 kg con una rapidez de 30 m/s en un tiempo de 8 s?
6. Se requieren 30 s para que un avión a reacción pase del reposo a la velocidad de despegue de 100 mph (44.7 m/s). ¿Cuál es la fuerza horizontal promedio que el asiento ejerce en la espalda de un pasajero de 60 kg durante el despegue? ¿Cómo se compara esta fuerza con el peso del pasajero?

7. ¿Cuál impulso se necesita para detener un automóvil de 1400 kg que viaja a 25 m/s?
8. Una pelota de goma suave ( $m = 0.5$  kg) caía verticalmente a 6 m/s justo antes de golpear el suelo y detenerse. ¿Cuál fue el impulso que experimentó la pelota? Si la pelota hubiera rebotado, ¿el impulso hubiera sido menor, igual, o mayor que el que usted calculó?
9. Un vehículo de 1500 kg tiene una velocidad de 30 m/s. Si se requieren 8 s para detener el automóvil, ¿cuáles son el impulso y la fuerza promedio que actúan sobre el auto?
10. Un entrenador batea elevados hacia los jardineros. Si la pelota de béisbol ( $m = 145$  g) permanece en contacto con el bate durante 0.04 s y se aleja del bate con una rapidez de 50 m/s, ¿cuál es la fuerza promedio que actúa sobre la pelota?
11. Una pelota de hule muy duro ( $m = 0.6$  kg) cae verticalmente a 8 m/s justo antes de rebotar en el suelo. En esencia, la pelota rebota con la misma rapidez. Si la colisión con el suelo dura 0.04 s, ¿cuál es la fuerza promedio que ejerce el suelo sobre la pelota?
12. Se lanza una pelota de tenis ( $m = 0.2$  kg) contra una pared de ladrillos. Viaja horizontalmente a 12 m/s justo antes de golpear la pared, rebota desde la pared a 8 m/s, y todavía viaja en forma horizontal. La pelota está en contacto con la pared durante 0.04 s. ¿Cuál es la magnitud de la fuerza promedio de la pared sobre la pelota?
13. Una bala de 30-06 de 150 granos tiene una masa de 0.01 kg y una velocidad de salida de 900 m/s. Si tarda 1 ms (milisegundo) para viajar por el cañón, ¿cuál es la fuerza promedio que actúa sobre la bala?
14. Un rifle 30-06 dispara una bala que tiene una masa de 10 g con una rapidez de 800 m/s. Si el rifle tiene una masa de 4 kg, ¿con cuánta rapidez recula?
15. Un padre ( $m = 80$  kg) y un hijo ( $m = 40$  kg) están de pie uno frente al otro en un estanque congelado. El hijo empuja al padre y se mueve hacia atrás a 3 m/s después que se han separado. ¿Con cuánta rapidez se moverá el padre?
16. Una mujer que tiene una masa de 50 kg corre con una rapidez de 8 m/s y salta sobre una patineta gigante que tiene una masa de 25 kg. ¿Cuál es la rapidez combinada de la mujer y la patineta?
17. Una pelota de 3 kg que viaja hacia la derecha con una rapidez de 4 m/s choca con una pelota de 4 kg que viaja hacia la izquierda con una rapidez de 3 m/s. ¿Cuál es el momento total de las dos pelotas antes y después de la colisión?
18. Una pelota de 4 kg que viaja hacia la derecha con una rapidez de 4 m/s choca con una pelota de 5 kg que viaja hacia la izquierda con una rapidez de 2 m/s. ¿Cuál es el momento total de las dos pelotas antes de que choquen? ¿Y después del choque?
19. Un automóvil de 1200 kg que viaja al norte a 14 m/s es alcanzado por detrás por un camión de 2000 kg que viaja a 25 m/s. ¿Cuál es el momento total antes y después de la colisión?
20. Si el camión y el automóvil del ejercicio 19 traban sus parachoques y quedan unidos, ¿cuál es su rapidez inmediatamente después de la colisión?
21. Dos furgones idénticos ( $m = 18\,000$  kg) viajan a lo largo de la misma vía, pero en direcciones opuestas. Ambos tienen una rapidez de 5 m/s. Si los furgones chocan y se enredan, ¿cuál será la rapidez final del par?
22. Un furgón que viaja a 10 m/s se acerca a una serie de tres furgones idénticos que están inmóviles sobre la vía. El furgón que se mueve choca y se enreda con los furgones inmóviles, y los cuatro se mueven juntos a lo largo de la vía. ¿Cuál es la rapidez final de los cuatro furgones inmediatamente después de la colisión?

# 6 Energía



© Cristovao/Shutterstock

*Los molinos de viento se perfeccionan para transformar la energía del viento en energía eléctrica.*

La energía es un artículo básico importante. Las personas y los países que saben cómo obtener y utilizar la energía por lo general son los más ricos y poderosos. Pero, ¿qué es la energía? Y, ¿qué queremos decir con que se conserva?

---

(Consulte la respuesta a esta pregunta en la página 111.)

---

**E**n el capítulo anterior, llegamos a comprender el momento al considerar el efecto de una fuerza que actúa durante cierto tiempo. Si, en lugar de eso, analizamos el movimiento de un objeto después que la fuerza ha actuado durante cierta distancia, encontramos otra cantidad que en ocasiones es constante, la energía del movimiento. Sin embargo, esta es sólo una forma de una constante más general y mucho más profunda conocida como energía.

conservación de la energía ➤

La energía total de un sistema aislado no cambia.

La energía es uno de los conceptos más fundamentales y de largo alcance en la visión del mundo de la física. Se requirieron casi 300 años para desarrollar por completo las ideas acerca de la energía y su conservación. En vista de su importancia y popularidad, es probable que piense que sería fácil ofrecer una definición precisa de la energía. No es así.

## ¿Qué es la energía?

El laureado Nobel Richard Feynman, en su obra *Lectures on Physics*, captura el carácter esencial de la energía y sus numerosas formas cuando analiza la ley de la conservación de la energía:

Existe cierta cantidad, la cual llamamos energía, que no cambia en los múltiples cambios que experimenta la naturaleza. Esa es una idea muy abstracta, porque es un principio matemático; afirma que existe una cantidad numérica que no cambia cuando ocurre algo. No es una descripción de un mecanismo, ni algo concreto; es sólo un hecho extraño que podamos calcular cierto número y cuando terminamos de observar cómo la naturaleza despliega sus trucos, y volvemos a calcular el número, es el mismo. (Algo similar al alfíl en un cuadro rojo, que después de varios movimientos —sin que se conozcan los detalles— todavía está en un cuadro rojo. Es una ley de esta naturaleza.) Debido a que es una idea abstracta, ejemplificaremos su significado mediante una analogía.

Imagine a un niño, tal vez “Daniel el Travieso”, que posee unos bloques absolutamente indestructibles, que no pueden fragmentarse. Cada uno es igual al otro. Supongamos que tiene 28 bloques. Su madre lo instala con sus 28 bloques en una habitación al inicio del día. Al final del día, por curiosidad, ella cuenta los bloques con mucho cuidado y descubre una ley fenomenal: sin importar lo que él haga con los bloques, siempre quedan 28. Esto continúa durante varios días, hasta que un día sólo hay 27 bloques, pero un poco de investigación demuestra que hay uno bajo la alfombra, ella debe mirar en todas partes para comprobar que el número de bloques no haya cambiado. Sin embargo, un día el número parece cambiar: sólo hay 26 bloques. Una investigación cuidadosa indica que la ventana estaba abierta, y luego de mirar afuera, aparecen los otros dos bloques. Otro día, una cuenta cuidadosa indica que hay 30 bloques. Esto provoca bastante consternación, hasta que recuerda que Bruce vino de visita, trajo consigo sus bloques, y dejó algunos en casa de Daniel. Después que ella entrega los bloques adicionales, cierra la ventana y prohíbe las visitas de Bruce, todo transcurre en orden, hasta que en una ocasión cuenta sólo 25 bloques. Sin embargo, en la habitación hay un juguetero. La madre se acerca a él, pero el niño grita, “No abras mi juguetero”. No permite a la madre abrirlo. Como tiene mucha curiosidad, y es ingeniosa, idea una acción. Sabe que un bloque pesa tres onzas, de modo que pesa la caja una ocasión que ve 28 bloques, y obtiene 16 onzas. La siguiente ocasión que quiere comprobar, vuelve a pesar la caja, resta 16 onzas y descubre lo siguiente:

$$(\text{número de bloques vistos}) + \frac{(\text{peso de la caja}) - 16 \text{ onzas}}{3 \text{ onzas}} = \text{constante}$$

Entonces parece que hay algunas desviaciones nuevas, pero un estudio cuidadoso indica que el agua sucia de la bañera cambia de nivel. El niño lanza los bloques al agua, y ella no puede verlos por el agua turbia, pero puede determinar cuántos bloques hay en el agua al incorporar otro término a su fórmula. Debido a que la lectura original del agua era 6 pulgadas y cada bloque eleva el nivel un cuarto de pulgada, esta nueva fórmula sería:

$$\left( \frac{\text{número de bloques vistos}}{\text{bloques vistos}} \right) + \frac{(\text{peso de la caja}) - 16 \text{ onzas}}{3 \text{ onzas}} + \frac{(\text{altura del agua}) - 6 \text{ pulgadas}}{\frac{1}{4} \text{ pulgada}} = \text{constante}$$

En el aumento gradual de la complejidad de su mundo, ella encuentra una serie completa de términos que representan maneras de calcular cuántos bloques hay en los lugares donde no puede verlos. Como resultado, establece una fórmula compleja, una cantidad que *debe calcularse*, y que siempre es la misma en su situación...

La analogía tiene los conceptos siguientes. Primero, cuando calculamos la energía, en ocasiones una parte de ella abandona el sistema y desaparece, u otras veces se incorpora un poco de energía. Para verificar la conservación de la energía, debemos tener cuidado que no se pierda ni se incorpore nada. Segundo, la energía tiene una gran cantidad de *formas diferentes*, y existe una fórmula para cada una... Si totalizamos las fórmulas para la contribución de cada una, no cambiarán, excepto por la energía que entra o sale.

Es importante comprender que en la física actual, no sabemos qué es la energía. No tenemos una imagen de que la energía venga en pequeñas gotas de una cantidad definida. No existe de ese modo. Sin embargo, existen fórmulas para calcular cierta cantidad numérica, y cuando sumamos todo, genera "28"; siempre el mismo número. Es algo abstracto porque no nos dice los mecanismos ni las *razones* para las diversas fórmulas.\*

## Energía del movimiento

### ✓ MATEMÁTICAS

La forma de energía más obvia es la que posee un objeto debido a su movimiento. Llamamos a esta cantidad de movimiento la **energía cinética** del objeto. Igual que el momento, la energía cinética depende de la masa y del movimiento del objeto. Pero la expresión para la energía cinética es diferente de la del momento. La energía cinética  $KE$  de un objeto es

$$KE = \frac{1}{2}mv^2$$

donde el factor de  $\frac{1}{2}$  hace que la energía cinética sea compatible con otras formas de energía, las cuales estudiaremos después.

Observe que la energía cinética de un objeto aumenta con el cuadrado de su rapidez. Esto significa que si un objeto duplica su rapidez, su energía cinética aumenta cuatro veces; si triplica su rapidez, su energía cinética aumenta nueve veces; y así sucesivamente.

**Pregunta** ¿Qué le ocurre a la energía cinética de un objeto si su masa se duplica mientras su rapidez se mantiene igual?

**Respuesta** Debido a que la energía cinética es directamente proporcional a la masa, la energía cinética se duplica.

Las unidades para la energía cinética y, por lo tanto, para todos los tipos de energía, son kilogramos multiplicados por (metros por segundo) al cuadrado,  $\text{kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}^2$ . Esta unidad de energía se llama **joule**. La energía cinética es diferente del momento en que no es una cantidad de vector. Un objeto tiene la misma energía cinética, sin tomar en cuenta su dirección, siempre y cuando no cambie su rapidez.

Un libro que se deja caer desde una altura de 10 centímetros (alrededor de 4 pulgadas) golpea el suelo con una energía cinética de aproximadamente 1 joule (J). La energía cinética de una persona de 70 kilogramos (154 libras) que corre con una rapidez de 8 metros por segundo es

$$KE = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}(70 \text{ kg})(8 \text{ m/s})^2 = (35 \text{ kg})(64 \text{ m}^2/\text{s}^2) = 2240 \text{ J}$$

✓ El suplemento *Problem Solving* (Solución de problemas) ofrece una presentación extendida.

◀ energía cinética  
=  $\frac{1}{2}$  de la masa  $\times$  rapidez al cuadrado

\*R. P. Feynman, R. B. Leighton y M. Sands, *The Feynman Lectures on Physics* (Reading, Mass.: Addison-Wesley, 1963), 1: 4-1 y 4-2.



## Conservación de la energía cinética

La búsqueda de constantes del movimiento suele implicar las colisiones. De hecho, al inicio de su descubrimiento, con frecuencia se confundían los conceptos de momento y energía cinética. Las cosas se aclararon mucho cuando se reconoció que los dos eran cantidades distintas. Ya hemos visto que el momento se conserva durante las colisiones. Bajo ciertas condiciones más restrictivas, la energía cinética también se conserva.

Considere la colisión de una bola de billar con una pared dura. Es obvio que la energía cinética de la bola no es constante. En el instante en que la bola invierte su dirección, su rapidez es cero y, por lo tanto, su energía cinética es cero. Como veremos, incluso si incluimos la energía cinética de la pared y la Tierra, no se conserva la energía cinética del sistema.

Sin embargo, si no nos preocupamos con los detalles de lo que ocurre durante la colisión y sólo observamos la energía cinética antes y después de la colisión, encontramos que la energía cinética casi se conserva. Durante la colisión, la pelota y la pared se distorsionan, lo cual produce fuerzas friccionales internas que reducen ligeramente la energía cinética. Pero una vez más ignoramos algunas cosas para llegar al núcleo del asunto. Supongamos que tenemos materiales “perfectos” y que podemos ignorar estos efectos friccionales. En este caso, la energía cinética de la bola después que se separa de la pared es igual a su energía cinética antes de golpear la pared. Las colisiones en las cuales se conserva la energía cinética se conocen como colisiones **elásticas**.

En realidad, muchas colisiones atómicas y subatómicas son perfectamente elásticas. Una aproximación en escala mayor de una colisión elástica sería entre los discos de hockey de aire que tienen imanes pegados en la parte superior para que se repelen entre sí.



© Corina Rosul / Dreamstime

**Figura 6-1** El aparato con bolas que chocan demuestra la conservación del momento y la energía cinética.

### FÍSICA | HÁGALO USTED MISMO

El aparato presentado en la figura 6-1 puede resultarle conocido. Tiene cinco bolas con masas iguales colgadas en fila para que puedan balancearse a lo largo de la fila. Si jala una bola en un extremo y la suelta, la última bola en el otro extremo se balancea con la velocidad que la original. Al saber que el momento y la energía cinética se conservan, ¿puede predecir lo que ocurrirá si jala dos bola y las suelta juntas? Intente este experimento si posee uno de estos juguetes.

Las colisiones en las cuales se pierde la energía cinética se conocen como colisiones **inelásticas**. La pérdida en la energía cinética aparece como otras formas de energía, principalmente en forma de calor, lo cual analizaremos en el capítulo 9. Las colisiones en las cuales los objetos se alejan con una velocidad común nunca son elásticas. Apreciaremos esto en el ejemplo de la bola de billar presentado al final de esta sección.

La conservación del momento y el grado en que se conserva la energía cinética determinan los resultados de las colisiones. Sabemos que las colisiones de las bolas de billar no son perfectamente elásticas porque escuchamos que chocan. (El sonido es una forma de energía y, por lo tanto, se traslada una parte de la energía.)

### FÍSICA | HÁGALO USTED MISMO

Determine las elasticidades relativas de pelotas hechas con diferentes materiales al dejarlas caer desde una altura uniforme sobre una superficie muy dura, como el piso de concreto o una placa gruesa de acero. Entre más elástico es el material, más cerca de su altura original regresará la pelota. ¿Una pelota de goma es más o menos elástica que una canica de vidrio? ¿Sus resultados coinciden con el uso cotidiano de la palabra *elástico*?

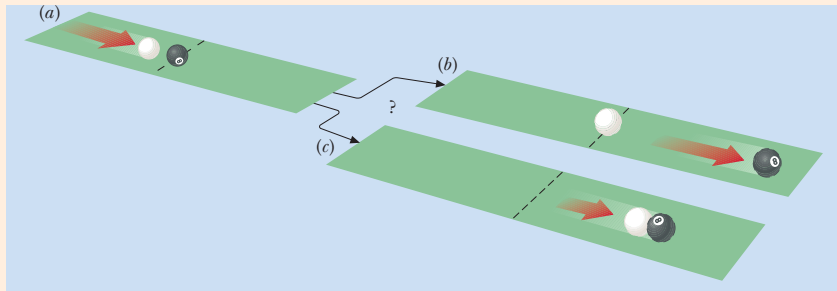


## SOLUCIÓN | Conservación de la energía cinética

Las colisiones entre objetos muy duros, como las bolas de billar, son casi elásticas. Considere la colisión de frente de una bola de billar que se mueve contra una de billar inmóvil (figura 6-2[a]). La bola que se mueve se detiene, y la que está inmóvil adquiere la velocidad inicial de la que se movía (figura 6-2[b]). Suponga que la masa de cada bola es 0.2 kg, y que la velocidad inicial es 4 m/s. Los momentos totales antes y después de la colisión son

$$p(\text{antes}) = m_1v_1 + m_2v_2 = (0.2 \text{ kg})(4 \text{ m/s}) + 0 = 0.8 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$$

$$p(\text{después}) = m_1v_1 + m_2v_2 = 0 + (0.2 \text{ kg})(4 \text{ m/s}) = 0.8 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$$



**Figura 6-2** (a) Una bola de billar en movimiento choca de frente con una bola inmóvil. ¿Cuál posibilidad ocurre? (b) La bola en movimiento se detiene, y la bola inmóvil continúa con la velocidad inicial. (c) Las bolas se mueven juntas con la mitad de la velocidad inicial.

Por lo tanto, el momento se conserva. Asimismo, las energías cinéticas antes y después de la colisión son

$$KE(\text{antes}) = \frac{1}{2}m_1v_1^2 + \frac{1}{2}m_2v_2^2 = \frac{1}{2}(0.2 \text{ kg})(4 \text{ m/s})^2 + 0 = 1.6 \text{ J}$$

$$KE(\text{después}) = \frac{1}{2}m_1v_1^2 + \frac{1}{2}m_2v_2^2 = 0 + \frac{1}{2}(0.2 \text{ kg})(4 \text{ m/s})^2 = 1.6 \text{ J}$$

Por lo tanto, la energía cinética también se conserva.

Pero ésta no es la única posibilidad que conserva el momento. Otra es que las dos bolas avancen en dirección hacia adelante, cada una con la mitad de la velocidad inicial (figura 6-2[c]). Ambas posibilidades conservan el momento total del sistema de dos bolas. Sin embargo, cuando efectuamos el experimento, la primera posibilidad es la que observamos siempre.

¿Por qué ocurre una y no la otra? La primera posibilidad conserva la energía cinética, pero la segunda no. Para ver que la segunda no conserva la energía cinética, calculamos de nuevo la energía cinética después de la colisión:

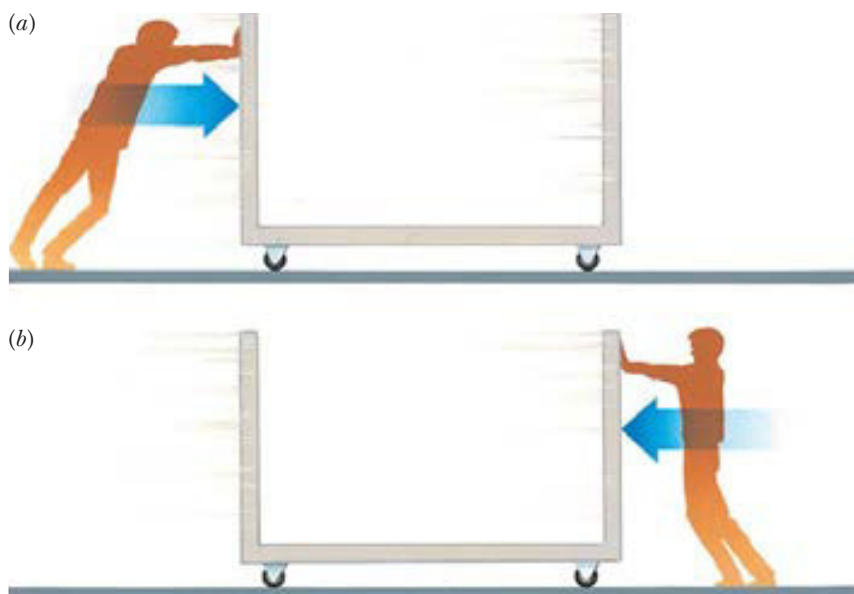
$$KE(\text{después}) = \frac{1}{2}m_1v_1^2 + \frac{1}{2}m_2v_2^2 = \frac{1}{2}(0.2 \text{ kg})(2 \text{ m/s})^2 + \frac{1}{2}(0.2 \text{ kg})(2 \text{ m/s})^2 = 0.8 \text{ J}$$

En este caso, se perdió la mitad de la energía cinética.

## Cambio en la energía cinética

Un carro que rueda a lo largo de una superficie horizontal sin fricción tiene cierta energía cinética porque se mueve. Una fuerza neta sobre el carro puede cambiar su rapidez y, por lo tanto, su energía cinética. Si usted empuja en la dirección que se mueve el carro, aumenta su energía cinética. Si empuja en la dirección opuesta, frena el carro y disminuye su energía cinética (figura 6-3).

**Figura 6-3** (a) Una fuerza en la dirección del movimiento aumenta la energía cinética. (b) Una fuerza opuesta a la dirección del movimiento disminuye la energía cinética.



Cuando una fuerza actúa durante cierto tiempo, produce un impulso que cambia el momento del objeto. En contraste, la *distancia* a través de la cual actúa la fuerza determina cuánto cambia la energía cinética. El producto de la fuerza  $F$  en la *dirección del movimiento* y la distancia recorrida  $d$  se conoce como el **trabajo**  $W$ :

trabajo = fuerza  $\times$  distancia recorrida ➤

$$W = Fd$$

A partir de la definición de trabajo, concluimos que las unidades de trabajo son newton-metros. Si sustituimos nuestra expresión anterior para un newton ( $\text{kg} \cdot \text{m/s}^2$ ), hallamos que un newton-metro ( $\text{N} \cdot \text{m}$ ) es igual a  $\text{kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}^2$ , lo cual es lo mismo que las unidades para la energía; es decir, un joule. Por lo tanto, las unidades de trabajo son iguales que las de la energía. En el sistema que se emplea en EUA, las unidades de trabajo son pie-libras.

La segunda ley de Newton y nuestras expresiones para la aceleración y la distancia recorrida se combinan con la definición de trabajo para demostrar que el trabajo efectuado sobre un objeto es igual al cambio en su energía cinética:

trabajo efectuado = cambio en energía ➤  
cinética

$$W = \Delta KE$$

Si la fuerza neta está en la misma dirección que la velocidad, el trabajo es positivo, y la energía cinética aumenta. Si la fuerza neta y la velocidad tienen direcciones opuestas, el trabajo es negativo, y la energía cinética disminuye.

## Fuerzas que no trabajan

El significado de *trabajo* en la física es diferente del uso común de la palabra. Las personas suelen hablar de “jugar” cuando lanzan una pelota y de “trabajar” cuando estudian física. La definición de trabajo en la física es muy precisa: ocurre un trabajo cuando el producto de la fuerza y la distancia es diferente de cero. Cuando usted lanza una pelota, en realidad hace un trabajo sobre la pelota; aumenta su energía cinética porque aplica una fuerza sobre una distancia. Aunque puede mover páginas y lápices mientras estudia física, la cantidad de trabajo es muy pequeña.

Asimismo, si sostiene una maleta sobre su cabeza durante 30 minutos, es probable que afirme que fue un trabajo difícil. Sin embargo, de acuerdo con la definición de la física, no hizo ningún trabajo en la maleta; los 30 minutos de esfuerzo y gruñidos no cambiaron la energía cinética de la maleta. Una mesa pudo sostener la maleta de la misma manera. Sin embargo, su cuerpo hace un trabajo fisiológico porque los músculos en sus brazos no se inmovilizan en su lugar, sino más bien se

# Distancias de paro para automóviles

Los datos para la distancia de paro que contienen los manuales de conductor no parecen tener una pauta sencilla, aparte de que entre más rápido maneje usted, más tiempo tarda en detenerse. Por ejemplo, el manual del conductor para el estado de Montana afirma que se requieren cuando menos 186 pies para detener un automóvil que viaja a 50 mph y sólo 65 pies para un vehículo que avanza a 25 mph. ¿Por qué la distancia de paro es un tercio de la que se requiere cuando la velocidad es la mitad? Además, estas tablas no mencionan el tamaño del automóvil.

La energía cinética de un vehículo depende de su rapidez y su masa. Cuando se aplican los frenos, las almohadillas frenan las ruedas, las cuales a su vez aplican una fuerza sobre la carretera. La fuerza de reacción de la carretera sobre el carro trabaja sobre éste, y reduce su energía cinética a cero. Para detenerlo, el trabajo total efectuado sobre el carro debe ser igual a su energía cinética inicial.

La fuerza friccional entre los neumáticos y el camino depende de la masa del vehículo y si ruedan o se deslizan. (Un deslizamiento reduce mucho la fuerza friccional.) La fuerza de la fricción no cambia mucho para diversos tipos de neumáticos o superficies del camino, siempre y cuando el camino no esté mojado o helado. Debido a que la fuerza friccional y la energía cinética son proporcionales a la masa del carro, la distancia de paro es independiente de la masa del vehículo. De modo que la distancia que recorre el vehículo después que se aplican los frenos depende casi por completo de su rapidez.

Las distancias en las tablas de un manual de conductor incluyen la distancia recorrida durante aproximadamente 1 segundo de tiempo de reacción, además de la distancia requerida para que los frenos detengan el automóvil. A 50 mph el auto viaja a 74 pies por segundo, de modo que la distancia

requerida para detenerlo una vez que se aplican los frenos es 186 pies – 74 pies = 112 pies.

Debido a que la energía cinética del automóvil cambia con el cuadrado de su velocidad, un auto que se desplaza a 25 mph sólo tiene una cuarta parte de la energía cinética de uno que viaja a 50 mph. Debido a que requiere sólo una cuarta parte del trabajo para detener el vehículo, la fuerza deberá actuar sólo durante un cuarto de la distancia. Un automóvil que viaja a 25 mph puede detenerse en  $\frac{1}{4} \times 112 \text{ pies} = 28 \text{ pies}$ . Durante el tiempo de reacción de 1 segundo, el vehículo viaja  $\frac{1}{2} \times 74 \text{ pies} = 37 \text{ pies}$  adicionales, de modo que la distancia total de paro es 28 pies + 37 pies = 65 pies. Las distancias de paro para otras velocidades se presentan en la tabla.

Distancias de paro para automóviles que viajan con una rapidez específica

Rapidez		Distancia de paro		
		Reacción	Frenado	Total
(mph)	(pies/s)	(pies)	(pies)	(pies)
10	15	15	5	20
20	29	29	18	47
30	44	44	40	84
40	59	59	72	131
50	74	74	112	186
60	88	88	161	249
70	103	103	220	323
80	117	117	287	404
90	132	132	363	495
100	147	147	448	595

crispan en respuesta a los impulsos nerviosos. Este trabajo se revela como calor (evidenciado por su sudor) y no como un cambio en la energía cinética de la maleta.

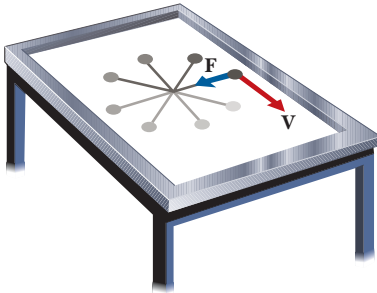
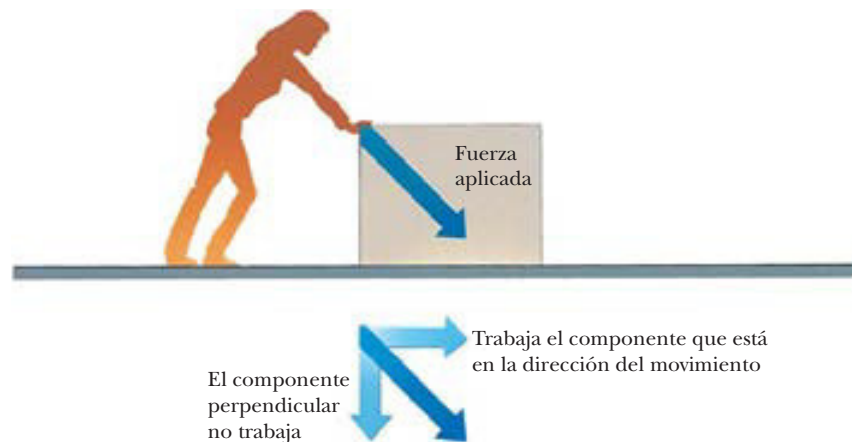
Existen otras situaciones en las cuales una fuerza neta no cambia la energía cinética de un objeto. Si la fuerza se aplica en una dirección perpendicular a su movimiento, la velocidad del objeto cambia, pero su rapidez no. Por lo tanto, la energía cinética no cambia. La definición de trabajo toma esto en cuenta al afirmar que sólo puede efectuar un trabajo la fuerza que actúa sobre la dirección del movimiento.

A menudo, una fuerza no es paralela ni perpendicular al desplazamiento de un objeto. Debido a que esta fuerza es un vector, podemos considerar que tiene dos componentes, uno paralelo y uno perpendicular al movimiento, como se ejemplifica en la figura 6-4. El componente paralelo trabaja, pero el perpendicular no hace ningún trabajo.

Considere un disco de hockey de aire que se mueve en un círculo en el extremo de una cuerda fijada al centro de la mesa que aparece en la figura 6-5. Debido a que la rapidez es constante, la energía cinética también es constante. La fuerza de gravedad se equilibra con la fuerza hacia arriba de la mesa. Estas fuerzas verticales se cancelan entre sí y no hacen ningún trabajo. La tensión que ejerce la cuerda sobre el disco no se cancela, pero no trabaja porque siempre actúa perpendicular a la dirección del movimiento.

Si la órbita de la Tierra fuera un círculo con el Sol en el centro, la fuerza gravitacional que ejerce el Sol sobre la Tierra no haría un trabajo, la Tierra tendría una energía cinética constante y, por lo tanto, una rapidez constante. Sin embargo,

**Figura 6-4** Dos fuerzas componentes perpendiculares pueden reemplazar cualquier fuerza. Sólo el componente que está en la dirección del movimiento trabaja sobre la caja.



**Figura 6-5** Cuando la fuerza es perpendicular a la velocidad, la fuerza no trabaja.

debido a que la órbita es una elipse, la fuerza no siempre es perpendicular a la dirección del movimiento (figura 6-6) y, por lo tanto, no trabaja sobre la Tierra. Durante una mitad de cada órbita, un pequeño componente de la fuerza actúa en la dirección del movimiento, y aumentan la energía cinética y la rapidez de la Tierra. Durante la otra mitad de cada órbita, el componente está en la dirección opuesta al movimiento y disminuyen la energía cinética y la rapidez de la Tierra.

## Energía gravitacional potencial

✓ **MATEMÁTICAS**

Cuando se lanza una pelota verticalmente, tiene cierta cantidad de energía cinética que desaparece conforme asciende. En la parte superior de su vuelo, no tiene energía cinética, pero mientras cae, la energía cinética reaparece. Si consideramos que la energía es una constante, nos hace falta una o más formas de energía.

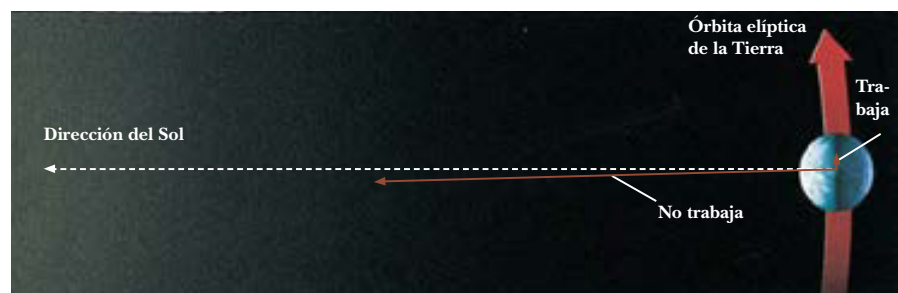
La pérdida y la reaparición de la energía cinética de la pelota se comprenden al examinar el trabajo efectuado sobre la pelota. Cuando la pelota asciende, la fuerza de gravedad realiza un trabajo negativo sobre la pelota y reduce su energía cinética hasta que llega a cero. Cuando baja, la fuerza de gravedad aumenta la energía cinética de la pelota por la misma cantidad que perdió cuando subía. En vez de simplemente afirmar que la energía cinética desaparece temporalmente, podemos retener la idea de la conservación de la energía al definir una nueva forma de energía. En tal caso, la energía cinética se transforma a esta nueva forma y después regresa a su forma original. Esta nueva energía se llama **energía gravitacional potencial**.

Tenemos algunos indicios para la expresión de esta nueva energía. Su cambio también debe obtenerse del trabajo efectuado por la fuerza de gravedad, y debe aumentar cuando disminuye la energía cinética, y viceversa. Por lo tanto, definimos la energía gravitacional potencial de un objeto como una altura  $h$  sobre algún nivel cero como igual al trabajo efectuado por la fuerza de gravedad sobre el objeto cuando cae a la altura cero. Entonces, la energía gravitacional potencial (GPE) de un objeto cerca de la superficie terrestre se obtiene mediante

energía gravitacional potencial =  $\rightarrow$   
fuerza de gravedad  $\times$  altura

$$GPE = mgh$$

**Figura 6-6** La fuerza gravitacional del Sol trabaja sobre la Tierra cuando la fuerza no es perpendicular a la velocidad de la Tierra. La naturaleza elíptica de la órbita se ha exagerado para presentar el componente paralelo.





Por ejemplo, podemos calcular la energía gravitacional potencial de una pelota de 6 kilogramos que está a 0.5 metro sobre el nivel que decidimos llamar cero:

$$GPE = mgh = (6 \text{ kg})(10 \text{ m/s}^2)(0.5 \text{ m}) = 30 \text{ J}$$

Observe que sólo es importante el componente vertical. Mover 100 metros hacia un lado un objeto no cambia la energía gravitacional potencial porque la fuerza de gravedad es perpendicular al movimiento y por lo tanto, no trabaja sobre el objeto.

**Pregunta** ¿Cuál es el cambio en la energía gravitacional potencial de una persona de 50 kilogramos que asciende un tramo de escaleras que tiene una altura de 3 metros y una medida horizontal de 5 metros?

**Respuesta** El cambio en la energía gravitacional potencial es

$$GPE = mgh = (50 \text{ kg})(10 \text{ m/s}^2)(3 \text{ m}) = 1500 \text{ J}$$

La medida horizontal no afecta la respuesta.

La magnitud de la energía gravitacional potencial que posee un objeto es una cantidad relativa. Su valor depende de cómo definimos la altura: es decir, cuál altura tomamos como el valor cero. Elegimos medir la altura desde cualquier lugar que sea conveniente. Lo único que tiene importancia física es el *cambio* en la energía gravitacional potencial. Si una pelota adquiere 20 joules de energía cinética mientras cae, debe perder 20 joules de energía gravitacional potencial. No importa cuánta energía gravitacional potencial tenía al principio; lo único que tiene cierto significado en la física es la cantidad perdida.

### Razonamiento defectuoso



Bill y Will calculan la energía gravitacional potencial de una pelota de 5 newtons sostenida 2 metros sobre el suelo del salón de clases.

**Bill:** “Esto es fácil. La energía gravitacional potencial es  $mgh$ , donde  $mg$  es el peso de la pelota. Sólo multiplicamos los 5 newtons por los 2 metros para obtener la energía gravitacional potencial de 10 joules.”

**Will:** “Olvidas que nuestro salón de clases está en el segundo piso. Debemos determinar qué tan alta está la pelota en relación con el suelo.”

**¿Coincide usted con uno de estos estudiantes?**

**Respuesta** Lo único que importa es la diferencia en la energía gravitacional potencial. Podemos decir que la pelota cayó de una altura de 2 metros a una altura de cero, o podemos decir que cayó de una altura de 5 metros (en relación con el suelo) a una altura de 3 metros. De cualquier modo, obtenemos la misma reducción en la energía gravitacional potencial y el mismo aumento en la energía cinética. Las respuestas de ambos estudiantes serían correctas. En general, suele ser más fácil para cada problema tomar como cero el punto más bajo de la altura.

## Conservación de la energía mecánica



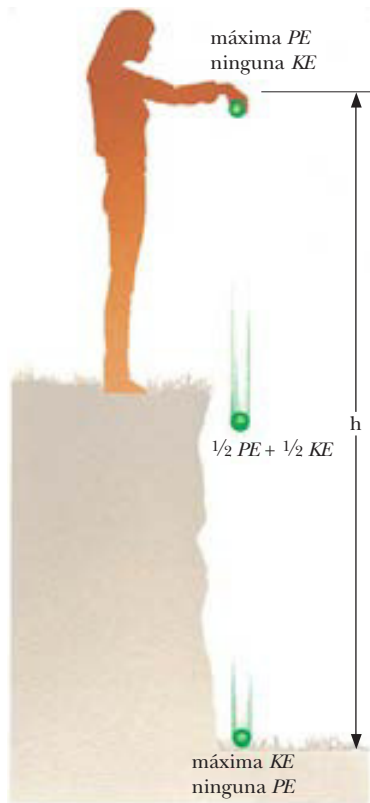
**MATEMÁTICAS**

En algunas situaciones, se conserva la suma de las energías gravitacional potencial y cinética. Esta suma se llama la **energía mecánica (ME)** del sistema:

$$ME = KE + GPE = \frac{1}{2}mv^2 + mgh$$

Cuando se pueden ignorar las fuerzas friccionales y las otras fuerzas no gravitacionales no realizan ningún trabajo, la energía mecánica del sistema no cambia. El

◀ energía mecánica = energía cinética + energía gravitacional potencial



**Figura 6-7** Cuando cae una pelota, la energía mecánica se conserva; cualquier pérdida en la energía gravitacional potencial aparece como una ganancia en la energía cinética.

ejemplo más sencillo de esta circunstancia es la caída libre (figura 6-7). Cualquier disminución en la energía gravitacional potencial se presenta como un incremento en la energía cinética, y viceversa.

Apliquemos la conservación de la energía mecánica para analizar una situación idealizada, analizada por primera vez por Galileo. Galileo soltaba una pelota que rodaba hacia abajo por una rampa, seguía un pista horizontal, y ascendía otra rampa, igual que la figura 6-8. Señaló que la pelota siempre regresaba a su altura original. Desde un punto de vista de energía, daba a la pelota cierta energía gravitacional potencial inicial al colocarla a cierta altura arriba de la rampa horizontal. Cuando la pelota bajaba por la primera rampa, su energía gravitacional potencial se transformaba a energía cinética. El ascenso por la rampa del otro lado invertía este proceso; la energía cinética de la pelota se volvía a convertir en energía gravitacional potencial. La pelota seguía moviéndose hasta que su energía cinética se volvía a convertir por completo en energía gravitacional potencial, lo cual ocurría cuando llegaba otra vez a su altura original. Este resultado es independiente de las pendientes de las rampas.

Durante la porción horizontal del viaje de la pelota, la energía gravitacional potencial se mantenía constante. Por lo tanto, la energía cinética no cambiaba y la rapidez permanecía constante, de acuerdo con la primera ley de Newton.

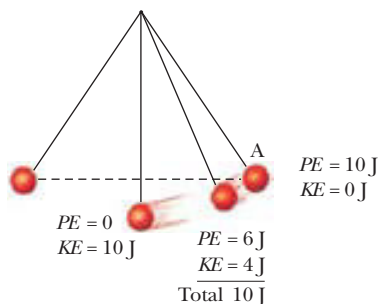
El plomo del péndulo exhibido en la figura 6-9 gana y pierde energía cinética y energía gravitacional potencial de manera cíclica. Observe que no trabaja la tensión que ejerce la cuerda. Por lo tanto, si ignoramos las fuerzas friccionales, se conserva la energía mecánica total. Suponga que al principio, el plomo tiene una rapidez cero en el punto A y una energía gravitacional potencial de 10 joules. (Hemos elegido que el cero para la energía gravitacional potencial esté en el punto más bajo de la trayectoria del plomo.) Debido a que la energía cinética es cero, la energía mecánica total es igual que la energía gravitacional potencial; es decir, 10 joules.

El plomo se suelta. Mientras oscila hacia abajo, pierde energía gravitacional potencial y gana energía cinética. La energía gravitacional potencial es cero en el punto más bajo de la oscilación, y de ese modo la energía mecánica es toda cinética y es igual a 10 joules. El plomo sigue en movimiento y ahora asciende al otro lado hasta que toda la energía cinética se vuelve a transformar en energía gravitacional potencial. Debido a que la energía gravitacional potencial depende de la altura, el plomo debe regresar a su altura original. Y el movimiento se repite.

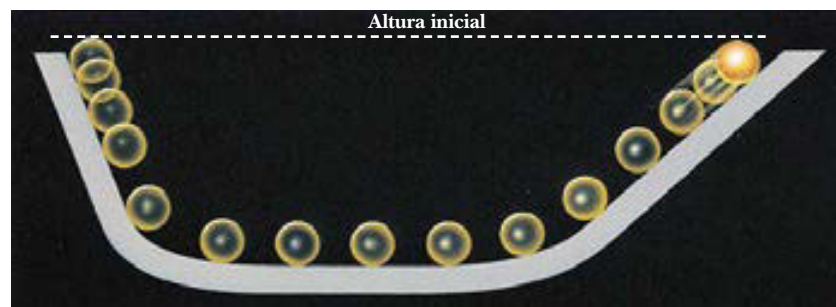
**Pregunta** Suponga que el plomo se suelta al doble de la altura. ¿Cuál es la energía cinética máxima?

**Respuesta** La energía gravitacional potencial inicial es ahora el doble, de modo que la energía cinética máxima también será el doble; es decir, 20 joules.

Incluso cuando el plomo está en algún lugar entre los puntos más alto y más bajo de la oscilación, la energía mecánica total todavía es de 10 joules. Si en este punto determinamos, por la altura del plomo, que tiene 6 joules de energía gravi-



**Figura 6-9** La energía mecánica total (cinética más gravitacional potencial) se mantiene igual en 10 joules.

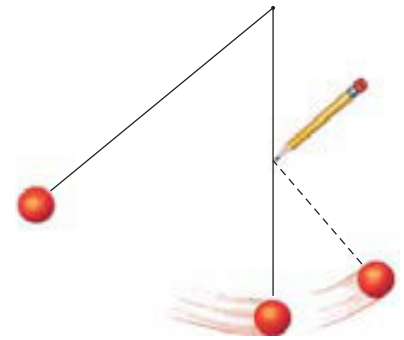


**Figura 6-8** El experimento con dos rampas de Galileo se puede analizar en términos de la conservación de la energía.

tacional potencial, de inmediato podemos declarar que tiene 4 joules de energía cinética. Debido a que conocemos la expresión para la energía cinética, podemos calcular la rapidez del plomo en este punto.

### FÍSICA | HÁGALO USTED MISMO

Construya un péndulo sencillo. Si lo deja oscilar libremente, regresa a su altura original. Si coloca un lápiz en la trayectoria de la cuerda, como se aprecia en la figura 6-10, ¿el plomo todavía oscilará a su altura original? ¿Su resultado depende de la altura vertical de la posición del lápiz? Coloque el lápiz cerca del punto más bajo de la oscilación.



**Figura 6-10** ¿A qué altura oscilará el plomo del péndulo?

## Montañas rusas

Imagine que intenta determinar la rapidez de un carro rodante que recorre las crestas y los valles de una montaña rusa. Es difícil determinar la rapidez de cualquier punto con la segunda ley de Newton debido a que cambian constantemente la magnitud y la dirección de las fuerzas. Sin embargo, podemos utilizar la conservación de la energía mecánica para determinar la rapidez de un objeto sin conocer los detalles de las fuerzas netas que actúan sobre él, siempre y cuando podamos ignorar las fuerzas friccionales. Si conocemos la masa, la rapidez y la altura del carrito en algún punto, podemos calcular su energía mecánica. Entonces se simplifica mucho determinar su rapidez en cualquier otro punto. La altura nos da la energía gravitacional potencial. Al restarla de la energía mecánica total se calcula la energía cinética de la cual obtenemos la rapidez del carro. Observe que no necesitamos preocuparnos por las transformaciones de energía que ocurrieron antes en el viaje.

Suponga que la montaña rusa fue diseñada como en la figura 6-11, y que al llegar a la parte superior de la colina más baja, el carro casi queda en reposo. Suponiendo que no hay fuerzas friccionales por las cuales preocuparse (lo cual no es cierto en situaciones reales), ¿existe alguna posibilidad de trepar la colina más alta? La respuesta es no. La energía gravitacional potencial en la parte superior de la colina es casi igual a la energía mecánica. Esta energía no basta para trepar la colina más alta. El carro ganará rapidez y, por lo tanto, energía cinética cuando baje la colina, pero cuando comience a trepar por la otra colina, será evidente que no puede ir más allá de la altura de la colina original.



**Figura 6-11** El carro no tiene energía gravitacional potencial suficiente para trepar la colina más alta.



© Jerry Zitterman/Shutterstock

La energía mecánica del carro de la montaña rusa se conserva si no se toman en cuenta las fuerzas friccionales.

**Pregunta** ¿Existe algún modo de que el carro pueda trepar la segunda colina si comienza en la parte superior de la primera colina?

**Respuesta** Sí. Si el carro tiene cierta energía cinética en la parte superior de la primera colina, puede llegar hasta arriba en la segunda. Se necesita suficiente energía cinética para igualar o exceder la energía gravitacional potencial adicional requerida para trepar por la segunda colina.

Nuestro uso de la conservación de la energía mecánica es limitado porque ignoramos las pérdidas debidas a las fuerzas friccionales y, en muchos casos, esto no es realista. Estas fuerzas friccionales hacen un trabajo sobre el carro y, por lo tanto, consumen una parte de su energía mecánica. Sin embargo, si conocemos la magnitud de estas fuerzas friccionales y las distancias sobre las cuales actúan, podemos calcular la energía transformada a otras formas y admitir la pérdida de energía mecánica.

¿Adónde va la energía consumida? Tendremos que esperar para obtener la respuesta a esta pregunta. Para mantener la noción de que la energía es una constante, tendremos que buscar otras formas de energía.

### Razonamiento defectuoso



La pregunta siguiente aparece en un examen final: “Tres osos lanzan rocas idénticas desde un puente hacia un río que está debajo. Papá Oso lanza su roca hacia arriba en un ángulo de 30 grados sobre la horizontal. Mamá Osa lanza la suya de manera horizontal. Bebé Oso lanza la roca en un ángulo de 30 grados bajo la horizontal. Suponiendo que los tres osos lanzan con la misma rapidez, ¿cuál roca viajará más rápido cuando llegue al agua?” Tres estudiantes se reúnen después del examen y analizan sus respuestas.

**Emma:** “La roca de Bebé Oso irá más rápido porque empieza con un componente de velocidad hacia abajo.”

**Héctor:** “Pero la roca de Papá Oso permanecerá más tiempo en el aire, por lo que tendrá más tiempo para acelerar. Creo que su roca será la que viaje más rápido.”

**M'Lynn:** “La roca de Papá Oso permanece más tiempo en el aire, pero parte de ese tiempo se mueve hacia arriba y frena. Creo que la roca de Mamá Osa viajará más rápido cuando toque el agua porque está más tiempo en el aire que la de Bebé Oso y acelera todo el tiempo.”

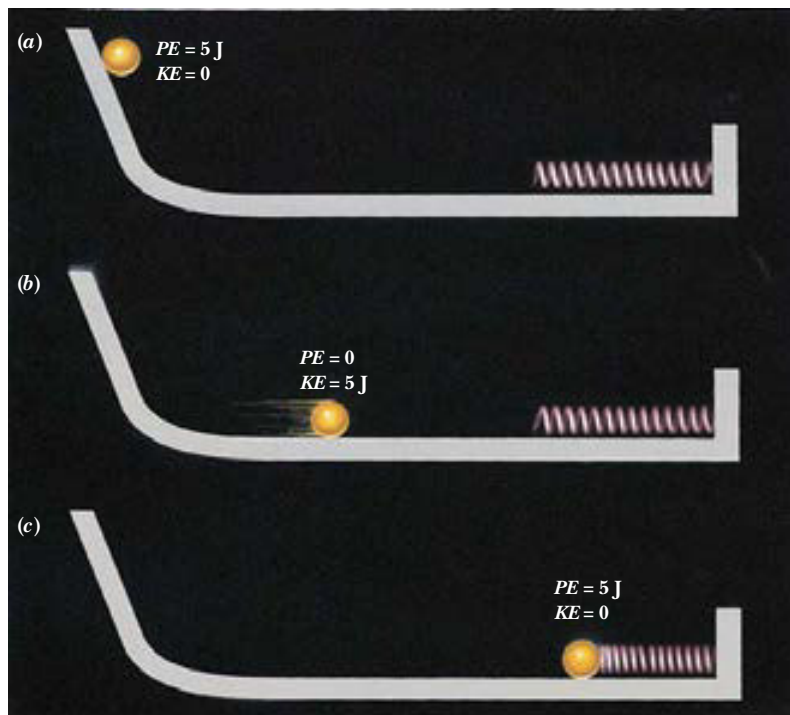
**¿Con la respuesta de cuál estudiante está usted de acuerdo?**

**Respuesta** Los tres estudiantes están equivocados. Vuelven muy difícil un problema fácil al ignorar el poder del método de la energía para resolverlo. Debido a que cada una de las tres rocas comenzó con la misma energía cinética (misma rapidez) y la misma energía gravitacional potencial (misma altura), todas deben terminar con la misma energía cinética final antes de chocar con el agua. Por lo tanto, las tres rocas deben tocar el agua con la misma rapidez. Observe que las tres rocas no tocarán el agua al mismo tiempo, ni con la misma velocidad, ni desde la misma distancia del puente. Sin embargo, el método de la energía no nos dará esta información.

### Otras formas de energía

Podemos identificar otros lugares donde se guarda temporalmente la energía cinética. Por ejemplo, una pelota en movimiento puede comprimir un resorte y perder su energía cinética (figura 6-12). Mientras el resorte está comprimido, conserva la energía de manera muy parecida a la pelota de la situación gravitacional. Si





**Figura 6-12** La energía gravitacional potencial: (a) se convierte en energía cinética, (b) la cual, a su vez, se convierte en la energía elástica potencial del resorte (c).

aseguramos el resorte mientras está en el estado comprimido, podemos guardar su energía indefinidamente como energía elástica potencial. Su liberación en una fecha futura convertirá otra vez la energía elástica potencial del resorte en la energía cinética de la pelota.

**Pregunta** Cuando se cuelga una pelota de un resorte vertical, lo estira. Conforme baja, pierde energía gravitacional potencial, pero esto no se presenta como energía cinética. ¿Qué le ocurre a la energía gravitacional potencial?

**Respuesta** La energía gravitacional potencial se convierte en la energía cinética y la energía elástica potencial del resorte. En la parte inferior, está toda la energía elástica potencial.

Un ejemplo emocionante de esto es el salto en caída libre. Se sujeta con firmeza una cuerda en los tobillos de un saltador, quien se lanza de cabeza desde una plataforma muy alta. Conforme el saltador cae, la energía gravitacional potencial se convierte en energía cinética. Cuando la cuerda se tensa y estira, la energía cinética y un poco de la energía gravitacional potencial adicional se convierten en energía elástica potencial. Cuando la cuerda alcanza su estiramiento máximo, el saltador rebota hacia arriba en el aire porque gran parte de la energía elástica potencial se convierte otra vez en energía cinética y gravitacional potencial. Después de varios rebotes, se baja al saltador hasta el suelo. Observe que si no hubiera pérdida de energía mecánica, ¡el saltador rebotaría para siempre!

Cuando una fuerza los distorsiona, muchos objetos o materiales conservan cierta energía elástica potencial como resultado de las distorsiones. Un piso cede cuando saltamos sobre él. Nuestra energía cinética en el impacto se transforma, en parte, en la energía elástica potencial del piso. Conforme el piso recobra su forma original, recuperamos una parte de esta energía cinética. En estos casos, una parte de la energía mecánica (tal vez, casi toda) se pierde en los efectos de disipación de la distorsión.

Hemos descrito una energía gravitacional potencial asociada con la fuerza gravitacional. Otras energías potenciales se asocian con otras fuerzas en la naturaleza. La energía elástica potencial en un resorte se debe a las fuerzas electromag-



Mientras cae el saltador de caída libre, la energía gravitacional potencial se convierte en energía cinética.



## Crecimiento exponencial

El uso de la energía en Estados Unidos ha aumentado a una tasa de cerca de 5% anual durante las décadas anteriores. A primera vista, esto suena relativamente inofensivo, pero no se engañe. Todo lo que aumenta en proporción a su tamaño actual se sale de control. Este tipo de crecimiento se llama *crecimiento exponencial*, y ya sea una cuenta bancaria, el uso de la energía, o la población, sigue la misma pauta. Esta pauta se ejemplifica con un relato sencillo de un matemático creativo.

Dice la leyenda que un matemático en la antigua India inventó el juego del ajedrez. El gobernante de la India estaba tan complacido que permitió al matemático elegir su propia recompensa. Este inteligente personaje descartó las recompensas obvias de oro y joyas, y en lugar de eso pidió granos de trigo. Su plan era poner un grano en el primer cuadro del tablero, y después duplicar el número de granos en cada cuadro sucesivo, de modo que habrían dos granos de trigo en el segundo cuadro, cuatro granos en el tercero, y así sucesivamente. Usted puede determinar la cantidad en cada cuadro con una simple calculadora. Sólo comience con el primer grano y siga multiplicando por dos, 64 veces.



© Larry D. Kirkpatrick

**Figura A** El 8o. cuadro tiene 128 granos de trigo.

Al final de la primera fila, hay 128 granos en el 8o. cuadro (figura A). No son muchos. Para el final de la segunda fila, el matemático sólo tiene trigo suficiente para hacer algunos panes. Pero, ¿qué sucede si continuamos esta pauta de duplicación? La fotografía de la figura B es sólo simbólica, porque el número de granos en el 64o. cuadro es de alrededor de ¡900 cuatrillones! Y el gran total es ¡el doble de esto! Esa cifra es aproximadamente 500 veces la cantidad de trigo cultivado



© Bohuslav Mayer/Dreamstime

**Figura B** El 64o. cuadro tiene 900 cuatrillones de granos de trigo. Por supuesto, la fotografía sencillamente es simbólica.



© SOHO/NASA/ESA

El Sol es un enorme almacén de energía nuclear.

néticas (eléctricas y magnéticas). También existen otras formas de energía electromagnética potencial. La energía química en realidad es sólo una energía potencial asociada con la fuerza electromagnética.

La transformación de estas diversas formas de energía potencial a energía cinética es lo que energiza nuestra civilización. La energía gravitacional potencial del agua detrás de las presas energiza las plantas hidroeléctricas; la de un plomo hace funcionar los relojes antiguos. Casi toda la energía que utilizamos todos los días es el resultado de liberar la energía química potencial de combustibles fósiles. Las plantas de energía nucleares están diseñadas para liberar la energía nuclear potencial. La energía nuclear potencial es la fuente final de la energía que recibimos del Sol.

Hemos definido diversas energías potenciales para explicar las pérdidas temporales de energía. Sin embargo, esta explicación no se aplica a situaciones que incluyen fricción. Para comprender la física de la fricción, considere lo siguiente. Hacemos que una caja se deslice sobre el piso con cierta cantidad de energía cinética. Mientras frena y llega a detenerse, su energía cinética disminuye y finalmente

en todo el mundo durante un año y es probable que sea más trigo que el cultivado durante toda la historia de la humanidad.

La pauta es muy importante. El proceso de duplicación comienza muy lento: un crecimiento leve, un tanto inocente, que termina por salirse de las manos. La leyenda concluye con la decapitación del matemático alrededor del 350. c. a. d. e., cuando se agotaron los graneros del país.

Existen otros ejemplos de crecimiento exponencial. Considere el interés compuesto que usted gana en una cuenta de ahorros. Suponga que el banco le ofrece una tasa de interés garantizada de 5% anual. Esta pauta de crecimiento es igual que la del ejemplo del ajedrez. Su dinero se duplicará cada cierta cantidad de años y se volverá a duplicar cada vez que transcurra esta cantidad de años. El *tiempo de duplicación* se obtiene al dividir 70 entre la tasa del porcentaje. Para su cuenta de ahorros, esto sería  $70/(5\%/año)$ , o 14 años. Si deposita \$1 en el banco hoy, se duplicará cada 14 años. En 100 años sus descendientes cobrarán \$128. Si optan por dejar el dinero en el banco a sus sucesores —por ejemplo, otros 400 años— su \$1 inicial se convierte en ¡\$64 000 millones! (A los banqueros no les preocupan las cuentas de 500 años de antigüedad, pero están muy conscientes de esta pauta y tienen reglas acerca de las cuentas inactivas.)

En el curso de la historia, el crecimiento de la población mundial ha sido aproximadamente exponencial. De acuerdo con el estimado de Naciones Unidas, la población mundial llegó a 6000 millones en octubre de 1999 y aumenta a una tasa de 1.3% anual. Esto no preocupa casi a nadie, porque parece una tasa de aumento muy baja. Sin embargo, si se mantuviera esta tasa, la población mundial se duplicaría en 55 años para un total de 12 000 millones en 2054. Pocas personas creen que la población mundial en realidad alcance esta cifra a mediados del siglo, porque la tasa de crecimiento disminuye y puede haber bajado a 0.5% (con un tiempo de duplicación de 140 años) para 2050. Si esto ocurre, la población mundial estará entre 9000 y 10 000 millones para 2050.

El crecimiento exponencial puede tener consecuencias muy serias porque los cambios grandes llegan muy rápido.

Podemos analizar otro ejemplo para apreciar la naturaleza del problema. Las bacterias son bastante singulares porque se multiplican al dividirse. Suponga que tiene una colonia de bacterias en la cual cada una se divide exactamente en dos al final de cada minuto. Por lo tanto, el tiempo de duplicación es 1 minuto. Suponga además que la botella en que están las bacterias estará exactamente llena al final de 1 hora; es decir, se requerirán 60 duplicaciones para llenar la botella. ¿Cuándo estará la botella a la mitad? En 59 minutos. Si usted fuera una bacteria, ¿cuándo comprendería que se le agota el espacio? Debido a que está leyendo este artículo, suponga que a los 55 minutos reconoce que el crecimiento es exponencial y que ocurrirá un problema importante. En ese momento, la botella estará llena sólo al 3%. ¿Cuánto éxito tendría para convencer a sus compañeras bacterias que sólo les quedan 5 minutos?

Imagine que durante el debate, un adversario argumenta que, con un financiamiento adecuado del gobierno, la colonia puede encontrar más espacio y que, de hecho, lo obtienen. Después de muchos gastos y esfuerzos, localizan tres botellas nuevas. Los recursos se han cuadruplicado. ¿Cuánto tiempo más puede continuar el crecimiento? La respuesta es sólo 2 minutos más.

La cuestión de esta discusión es comprender nuestro uso actual de la energía. Es evidente que no podemos permitir que nuestro uso crezca exponencialmente. Aunque existen variaciones considerables en los estimados de los recursos de energía no renovables del mundo, todos los estimados carecerán de importancia si continúa el crecimiento exponencial. ¿Existe realmente alguna diferencia si hemos subestimado estos recursos por un factor de dos, o incluso de cuatro? No. Si seguimos aumentando el uso de estos recursos, incluso por un porcentaje mínimo cada año, se agotarán rápidamente. Durante el siguiente tiempo de duplicación, usaremos tanta energía como la utilizada por la humanidad hasta el presente.

---

Fuente: A. A. Bartlett, "Forgotten Fundamentals of the Energy Crisis", *The Physics Teacher* 46 (1978): 876.

llega a cero. Podríamos imaginar que esta energía se conservó en alguna forma de "energía friccional potencial". Si éste fuera el caso, de algún modo podríamos liberar esta energía friccional potencial, y la caja se movería sobre el suelo y ganaría energía cinética de manera continua. Esto no ocurre. Como analizaremos en el capítulo 9, cuando actúan fuerzas friccionales, una parte de la energía cambia de forma y aparece como energía térmica.

## ¿La conservación de la energía es un engaño?

Puede parecer extraño que cada que descubrimos una situación en la cual parece que no se conserva la energía, inventamos una nueva forma de energía. ¿Cómo puede tener validez la ley de la conservación si seguimos modificándola dondequiera que parece ser violada? De hecho, todo el procedimiento no tendría validez si no fuera internamente coherente, lo que significa que la cantidad total de energía se mantiene igual, sin importar la secuencia de cambios que ocurra. Esta idea de la coherencia interna impone una restricción bastante fuerte sobre la ley de la conservación de la energía.

La energía gravitacional potencial del agua detrás de la presa Hoover se convierte a energía eléctrica.

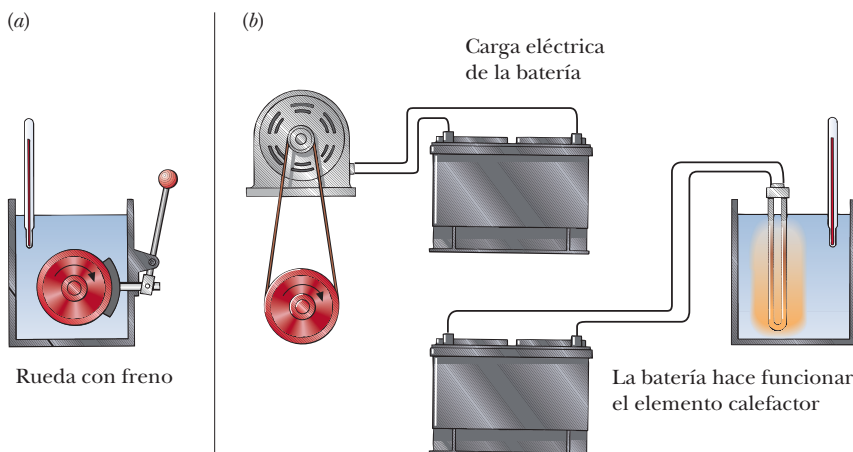


© Bureau of Reclamation

Imagine una rueda giratoria que utiliza 10 joules de energía cinética. Si extraemos esta energía al detener la rueda con un freno, terminamos con 10 joules de energía térmica, como se aprecia en la figura 6-13 (a). En lugar de eso, imagine que convertimos los 10 joules de energía cinética a energía eléctrica al hacer girar un generador para cargar una batería, y luego utilizamos la energía química de la batería para producir la electricidad que hace funcionar un calefactor (figura 6-13[b]). Todavía obtenemos los 10 joules de energía térmica. Este resultado es tranquilizador. Si el resultado fuera diferente, no tendríamos un principio científico válido. La conservación de la energía es un concepto útil porque las expresiones matemáticas para los diferentes tipos de energía son independientes de las situaciones específicas en las cuales ocurren.

La conservación de la energía es uno de los principios más poderosos en la visión del mundo de la física, en parte debido a su generalidad; su única restricción es que el sistema debe aislarse, o cerrarse. La conservación de la energía se aplica a una amplia variedad de problemas en la física y en nuestro mundo cotidiano.

**Figura 6-13** Las dos rutas diferentes para la transformación de la energía cinética de la rueda producen la misma cantidad de energía térmica.





## Potencia humana

Una persona puede generar 1500 watts (2 caballos de fuerza) por periodos muy breves, como en el levantamiento de pesas. La potencia humana promedio máxima para un día de ocho horas se acerca más a 75 watts (0.1 caballo de fuerza). Cada persona en una habitación genera energía térmica equivalente a la de una bombilla de 75 watts. Esa es una de las razones por las que hace calor en una habitación atestada.

El logro de un vuelo propulsado por humanos ha sido un sueño durante siglos. Las personas fracasaban porque

era difícil crear suficiente sustentación aerodinámica con la potencia energética posible para los humanos. En 1979, un equipo estadounidense dirigido por Paul MacCready diseñó, construyó y voló una “bicicleta alada” que demostró de manera convincente que es posible un vuelo propulsado por humanos. El ciclista profesional Bryan Allen cruzó el Canal de la Mancha en la *Gossamer Albatross*. Durante este vuelo generó una potencia energética promedio de 190 watts (0.25 caballos de fuerza).



La aeronave propulsada por humanos *Gossamer Albatross*, que voló exitosamente sobre el Canal de la Mancha en 1979.

## Potencia

En los capítulos anteriores analizamos cómo cambian diversas cantidades con el tiempo. Por ejemplo, la rapidez es el cambio de posición con el tiempo, y la aceleración es el cambio de la velocidad con el tiempo. El cambio de la energía con el tiempo se llama **potencia**. La potencia  $P$  es igual a la cantidad de energía convertida de una forma a otra  $\Delta E$  dividida entre el tiempo  $\Delta t$  durante el cual ocurre la conversión:

$$P = \frac{\Delta E}{\Delta t}$$

$$\blacktriangleleft \text{potencia} = \frac{\text{energía convertida}}{\text{tiempo transcurrido}}$$

La potencia se mide en unidades de joules por segundo, una unidad métrica conocida como **watt** (W). Un watt de potencia elevaría una masa de 1 kilogramo (con un peso de 10 newtons) una altura de 0.1 metro cada segundo.

La unidad inglesa para la potencia eléctrica es el vatio o watt, pero se utiliza una unidad inglesa diferente para la potencia mecánica. Un caballo de fuerza se define como 550 pies-libras por segundo. Esta definición fue propuesta por el inventor escocés James Watt porque encontró que un caballo vigoroso normal podría producir 550 pies-libras de trabajo durante un día laboral completo. Un caballo de fuerza es igual a 746 watts.

Obtenemos energía eléctrica de una empresa energética del lugar. Pero la electricidad no es una cantidad de energía. La energía transformada durante un periodo se obtiene mediante la potencia multiplicada por el tiempo que se consumió esta potencia. Las compañías energéticas suelen facturarnos por la cantidad de energía que utilizamos, no la tasa de consumo.



## SOLUCIÓN | Potencial

Un automóvil compacto que viaja a 27 m/s (60 mph) en una carretera nivelada experimenta una fuerza friccional de cerca de 300 N, debido a la resistencia del aire y la fricción de los neumáticos con el camino. Por lo tanto, el automóvil debe obtener energía suficiente del consumo de gasolina para compensar el trabajo realizado por las fuerzas friccionales cada segundo:

$$\Delta E = W = Fd = (300 \text{ N})(27 \text{ m}) = 8100 \text{ J}$$

$$P = \frac{\Delta E}{\Delta t} = \frac{8100 \text{ J}}{1 \text{ s}} = 8100 \text{ W}$$

Esto significa que la potencia necesaria es 8100 W, u 8.1 kW. Esto equivale a poco menos de 11 caballos de fuerza.

¿Cuánta energía eléctrica requiere un motor que funciona a 1000 W durante 8 h?

$$\Delta E = P\Delta t = (1000 \text{ W})(8 \text{ h}) = 8000 \text{ Wh}$$

Esto suele escribirse como 8 kilowatts-hora (kWh). Aunque esto no parece una unidad de energía, lo es: (unidad de energía)  $\times$  tiempo = energía.

La energía utilizada por el motor en 1 h es:

$$\Delta E = P\Delta t = (1000 \text{ W})(1 \text{ h}) = (1000 \text{ J/s})(3600 \text{ s}) = 3\,600\,000 \text{ J}$$

En otras palabras, 1 kWh = 3.6 millones de J.

**Pregunta** ¿Cuánta energía se requiere para dejar encendida una luz de patio de 75 watts durante 8 horas?

**Respuesta**  $\Delta E = P\Delta t = (75 \text{ watts})(8 \text{ h}) = 600 \text{ watts-hora} = 0.6 \text{ kilowatt-hora}.$

## Resumen

La energía es una cantidad abstracta que se conserva cuando un sistema está cerrado. Independientemente de los tipos de transformaciones que ocurren dentro de un sistema cerrado, la cantidad total de energía se mantiene igual.

La energía cinética es la energía del movimiento y se define como la mitad de la masa por la rapidez al cuadrado,  $KE = \frac{1}{2}mv^2$ . Si la energía cinética antes de una colisión es igual que después de la colisión, la colisión conserva la energía cinética y se dice que es elástica. La energía cinética se transforma en otras formas de energía en las colisiones inelásticas.

El trabajo es igual al producto de la fuerza en la dirección del movimiento y la distancia recorrida; es decir,  $W = Fd$ . Si la fuerza es perpendicular al desplazamiento del objeto o si el objeto no se mueve, la fuerza no efectúa ningún trabajo. El cambio en la energía cinética de un objeto es igual al trabajo efectuado sobre el objeto.

La energía gravitacional potencial es igual al trabajo efectuado por la fuerza de la gravedad cuando un objeto cae por una altura  $h$ ; es decir,  $GPE = mgh$ . La ubicación para el valor cero de la energía gravitacional potencial es arbitraria, porque sólo el cambio en la energía gravitacional potencial tiene algún significado físico. Si la gravedad es la única fuerza que trabaja sobre un objeto, se conserva la energía mecánica total (cinética más gravitacional potencial). Por lo tanto, cualquier pérdida en la energía gravitacional potencial se muestra como una ganancia en la energía cinética, y viceversa.



Otras formas de energía potencial se pueden asociar con las fuerzas electromagnéticas y nucleares. Sin embargo, una energía potencial no puede asociarse con la fuerza friccional. Esta fuerza transforma la energía mecánica en energía térmica.

La potencia es la tasa a la que la energía se transforma de una forma a otra,  $P = \Delta E / \Delta t$ . Un kilowatt-hora es una unidad de energía porque es la potencia multiplicada por el tiempo.

## Capítulo 6



## Revisión

En realidad no sabemos qué es la energía, pero conocemos las numerosas formas que adopta y tenemos un sistema contable para determinar la cantidad de energía en un sistema. Cuando decimos que se conserva la energía, reconocemos que aunque la energía cambia de una forma a otras, la cantidad total de energía en el sistema permanece igual. Por esta razón, podemos dar seguimiento a la energía.

### TÉRMINOS IMPORTANTES

**elástica:** Una colisión o interacción en la cual se conserva la energía cinética.

**energía cinética:** La energía del movimiento,  $KE = \frac{1}{2}mv^2$ , donde  $m$  es la masa del objeto y  $v$  es su rapidez.

**energía gravitacional potencial:** El trabajo que haría la fuerza de gravedad si un objeto cayera desde un punto específico en el espacio a un lugar al que se asigna el valor de cero,  $GPE = mgh$ .

**energía mecánica:** La suma de la energía cinética y las diversas energías potenciales, entre las cuales pueden estar las energías gravitacional y elástica potenciales.

**inelástica:** Una colisión o interacción en la cual no se conserva la energía cinética.

**joule:** La unidad de energía del SI, igual a 1 newton, que actúa sobre una distancia de 1 metro.

**potencia:** La tasa a la que se convierte la energía de una forma a otra,  $P = \Delta E / \Delta t$ , medida en joules por segundo, o watts.

**trabajo:** El producto de la fuerza sobre la dirección del movimiento y la distancia recorrida,  $W = Fd$ . Se mide en unidades de energía, joules.

**watt:** La unidad de potencia del SI, 1 joule por segundo.

### PREGUNTAS CONCEPTUALES

1. Dos automóviles idénticos que viajan a la misma velocidad chocan de frente y quedan en reposo en un montón de destrozos. A primera vista parece que en esta colisión no se conservó la energía. Sin embargo, igual que la madre de Daniel en el relato de Richard Feynman al inicio del capítulo, encontramos la energía “oculta” en muchas formas diferentes. La energía cinética inicial se transformó en energía de sonido, energía térmica, energía de deformación. ¿Dónde se oculta el momento inicial del sistema?
2. En un sistema aislado, la energía siempre se conserva. Sin embargo, este capítulo comienza con la afirmación de que la energía del movimiento sólo en ocasiones es constante, incluso para un sistema aislado. ¿Cómo se conserva la energía total al mismo tiempo que no se conserva la energía del movimiento?
3. Le han pedido que analice una colisión en una intersección de tránsito. ¿Será mejor que comience su análisis con la conservación del momento o la conservación de la energía cinética? ¿Por qué?
4. Un automóvil deportivo con una masa de 1200 kilogramos baja por el camino con una velocidad de 20 metros por segundo. ¿Por qué no podemos decir que el momento es menor que su energía cinética?
5. Si un sistema tiene una energía cinética cero, ¿necesariamente tiene un momento cero? Proporcione un ejemplo que esclarezca su respuesta.
6. Si un sistema tiene un momento cero, ¿necesariamente tiene una energía cinética cero? Ofrezca un ejemplo para ahondar su respuesta.
7. ¿Qué tiene una energía cinética mayor, un súper tanque anclado en un muelle o un bote de motor que jala a un esquiador? ¿Por qué?
8. Dos camionetas que tienen la misma masa avanzan por la carretera. Si la rapidez de la Chevy es el doble que la de la Ford, ¿la Chevy tiene el doble de la energía cinética que la Ford? Explique su respuesta.
9. Suponga que una minivan tiene una masa de 2000 kilogramos y un automóvil deportivo tiene una masa de

1000 kilogramos. Si ambos vehículos viajan con la misma rapidez, ¿cuál vehículo tiene mayor energía cinética? ¿Por qué?

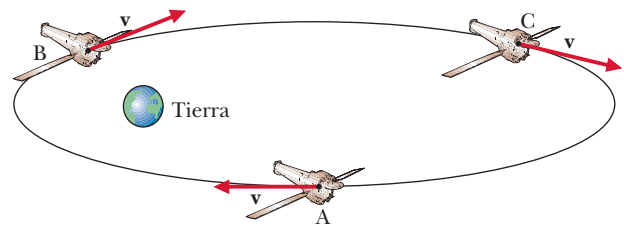
10. Si la rapidez del automóvil deportivo de la pregunta 9 es el doble que la de la minivan, ¿cuál vehículo tiene mayor energía cinética? ¿Por qué?
11. Un Camry plateado recorre la carretera a 70 mph constantes. Otro Camry, idéntico pero blanco, está en la rampa de acceso y acelera a 5 mph por segundo. Compare sus energías cinéticas en el instante en que el Camry blanco llega a 70 mph.
12. Un avión da vueltas sobre el aeropuerto de Salt Lake City con una rapidez y una elevación constantes. ¿Cómo cambia la energía cinética del avión, si llega a hacerlo, conforme da vueltas? ¿Cómo cambia el momento del avión, si llega a hacerlo, conforme da vueltas?
13. ¿Qué ocurrirá si usted jala dos bolas del mismo lado del aparato de bolas que chocan de la figura 6-1 y las suelta?
14. ¿Qué ocurrirá si jala las mismas distancias las bolas de los extremos del aparato de bolas que chocan de la figura 6-1 y las suelta?
15. Un jugador de bolos levanta una bola del suelo y la pone en un anaquel. Si usted conoce el peso de la bola, ¿qué otra cosa debe saber para calcular el trabajo que el jugador aplica sobre la bola?



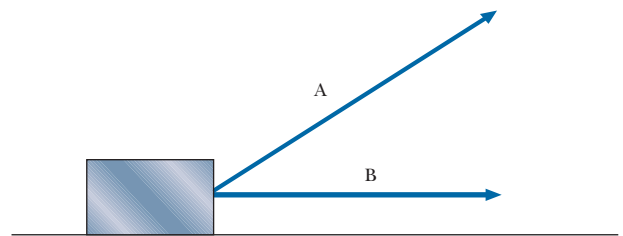
16. El empleo de Bill es levantar bolsas de harina y ponerlas en la parte trasera de un camión, el cual está estacionado junto a él. Sally carga las mismas bolsas de harina en un camión similar que está a 10 metros de distancia. Sally quiere un aumento de sueldo porque dice que hace más trabajo que Bill. ¿La definición de trabajo en la física apoya su afirmación?
17. Un avión vuela hacia el sur cuando experimenta una ráfaga de viento que ejerce una fuerza que actúa en dirección norte. ¿La inercia cinética inicial del avión aumenta, disminuye, o permanece igual? Explique.
18. Una bola de bolos rueda directamente al norte sobre un piso liso. Con un martillo, usted golpea la bola de modo que la fuerza se dirige al este. ¿Cómo afecta el golpe la energía cinética y el momento de la bola?
- ▲ 19. En las eliminatorias para el equipo nacional de bobsled, cada equipo competidor impulsa un trineo sobre una superficie nivelada y lisa por 5 metros. Un equipo lleva un trineo mucho más ligero que todos los demás. Suponiendo que cada equipo impulsa con la misma fuerza neta, compare la energía cinética del trineo ligero con la de los demás después de 5 metros. Compare el momento del trineo ligero con la de los demás después

de 5 metros. (*Sugerencia:* Considere los tiempos relacionados.)

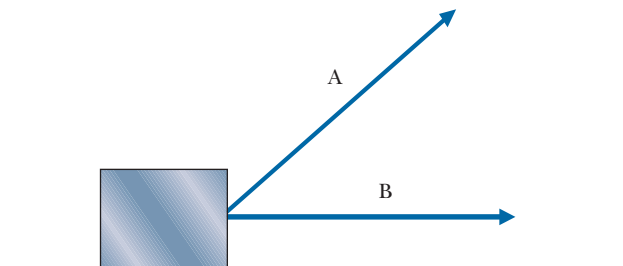
- ▲ 20. Suponga que cambiaron las reglas en la pregunta 19, de modo que los equipos impulsan durante un tiempo fijo de 5 segundos, en lugar de una distancia fija de 5 metros. Compare el momento del trineo ligero con el de los demás después de 5 segundos. Compare la energía cinética del trineo ligero con la de los demás después de 5 segundos. (*Sugerencia:* Considere la distancia relacionada.)
21. El tractor de un vehículo de 18 ruedas realiza un trabajo sobre su remolque cuando viaja por una carretera nivelada con una velocidad constante. ¿Por qué el remolque no gana energía cinética de manera continua; es decir, por qué no acelera continuamente?
22. El satélite de rayos X Chandra orbita la Tierra en una órbita muy elíptica, como se aprecia en la figura. La fuerza que ejerce la Tierra sobre el satélite siempre se dirige hacia la Tierra. ¿La energía cinética del satélite aumenta, disminuye, o permanece igual en cada uno de los puntos indicados? Explique su razonamiento. (*Nota:* Los vectores de velocidad en la figura *no* están dibujados a escala.)



23. Se utilizan dos fuerzas para mover un bloque 2 metros sobre una superficie nivelada, como la de la figura. ¿El trabajo que realiza la fuerza A es mayor que, igual a, o menor que el trabajo efectuado por la fuerza B? (*Nota:* Los vectores de fuerza están dibujados a escala.)



24. Se aplican dos fuerzas para desplazar un bloque 2 metros sobre una superficie nivelada, igual que en la figura. ¿El trabajo que realiza la fuerza A es mayor que, igual a, o menor que el trabajo efectuado por la fuerza B? (*Nota:* Los vectores de fuerza están dibujados a escala.)



25. Dos automóviles tienen masas diferentes, pero energías cinéticas iguales. Si se utiliza la misma fuerza friccional para detener cada automóvil, ¿cuál vehículo, si es el caso, se detendrá en una distancia menor?
- ▲ 26. Dos automóviles tienen masas diferentes, pero momentos lineales iguales. Si se utiliza la misma fuerza friccional para detener cada automóvil, ¿cuál vehículo, si es el caso, se detendrá en una distancia menor? (*Sugerencia:* ¿Cuál automóvil tiene mayor energía cinética?)
- ▲ 27. Podemos utilizar la tercera ley de Newton para demostrar que el momento que pierde un objeto lo gana otro. ¿También ocurre esto con la energía cinética? Explique por qué sí o por qué no.
28. ¿Es posible cambiar el momento de un objeto sin modificar su energía cinética? Y, ¿es posible el cambio en la situación inversa?
29. ¿Cuál de los siguientes, si es el caso, hace más trabajo: una fuerza de 3 newtons que actúa sobre una distancia de 3 metros, o una fuerza de 4 newtons que actúa sobre una distancia de 2 metros?
30. ¿Cuál de los siguientes, si es el caso, produce un cambio mayor en la energía cinética: una fuerza de 5 newtons que actúa sobre una distancia de 3 metros, o una fuerza de 4 newtons que actúa sobre una distancia de 4 metros?
31. En una prueba, el maestro de física pregunta, “¿Cuál es la energía gravitacional potencial de una pelota de 10 newtons que está en reposo en un anaquel a 2 metros sobre el suelo?”. Jamie no obtiene puntos porque afirma que la respuesta es cero. ¿Cuál argumento puede aplicar Jamie para convencer al maestro que cero puede ser una respuesta correcta?
32. Mientras un bombero se desliza por el poste, al principio acelera hasta cierta velocidad terminal, la cual conserva hasta llegar abajo. La energía gravitacional potencial disminuye constantemente durante este proceso. ¿Qué le ocurre a la energía?
33. La energía cinética de una pelota en caída libre no se conserva. ¿Por qué esto no es una violación de la ley de la conservación de la energía mecánica?
34. ¿Cuál de los siguientes se conserva mientras una pelota está en caída libre en el vacío: la energía cinética, la energía potencial gravitacional, el momento, o la energía mecánica de la pelota?
35. ¿En cuál punto de la oscilación de un péndulo ideal (ignorando la fricción) está al máximo la energía gravitacional potencial? ¿En cuál punto está al máximo la energía cinética?
36. Mientras un péndulo ideal (ignorando la fricción) oscila desde la parte inferior hasta la parte superior de su arco, las cuerdas siempre ejercen una fuerza sobre el plomo. Entonces, ¿por qué la energía gravitacional potencial en la parte superior no es mayor que la energía cinética en la parte inferior?
37. Si no ignoramos las fuerzas friccionales, ¿qué puede usted decir acerca de la altura desde la cual oscila el plomo de un péndulo en oscilaciones consecutivas?
38. Un bloque de madera, liberado desde un punto en reposo, pierde 100 joules de energía gravitacional potencial mientras se desliza hacia abajo por una rampa. Si tiene 90 joules de energía cinética en la parte inferior de la rampa, ¿a cuáles conclusiones llega usted?
39. Describa las transformaciones de energía que ocurren mientras un satélite orbita la Tierra en una órbita muy elíptica.
40. Imagine una catapulta gigante que puede lanzar una nave espacial a la Luna. Describa las transformaciones de energía que ocurrirían en tal viaje.
41. Describa los cambios de energía que ocurren cuando usted regatea con una pelota de baloncesto.



© Monkey Business Images/Dreamstime



© Lorraine Swanson/Shutterstock

42. Un elefante, una hormiga y un profesor saltan desde una mesa de conferencias. Suponiendo que no hay pérdidas friccionales, ¿cuál de las afirmaciones siguientes puede expresarse sobre su movimiento justo antes que lleguen al suelo?
  - a. Todos poseen la misma energía cinética.
  - b. Todos comenzaron con la misma energía gravitacional potencial.
  - c. Todos experimentan la misma fuerza al detenerse.
  - d. Todos tienen la misma rapidez.
43. Unos imanes montados en la parte superior de los discos de hockey de aire permiten a los discos “chocar” sin tocarse entre sí. Describa las transformaciones de energía que ocurren cuando un disco choca de frente con otro.
44. Un disco de hockey de aire se sujeta a la mesa con un resorte para que oscile hacia delante y hacia atrás encima de la mesa. Describa las transformaciones de energía que ocurren. ¿Cómo cambiaría su descripción si el disco se colgara del techo con un resorte?
45. Las carreteras de montañas suelen tener rampas de emergencia para los vehículos que se quedan sin frenos. ¿Por qué las rampas están cubiertas con tierra suave o arena en lugar de pavimento?



© Benkrut/Dreamstime

46. Los atletas en ocasiones corren por la playa para aumentar el efecto de su entrenamiento. ¿Por qué es agotador correr sobre arena suave?
47. ¿Qué le sucede a la energía química potencial en las baterías utilizadas para energizar los calcetines eléctricos?
48. Describa los cambios de energía que ocurren cuando usted detiene su automóvil al pisar los frenos.
49. ¿Por qué no asociamos una energía potencial con la fuerza friccional, tal como hicimos con la fuerza gravitacional?
50. Un libro de física se lanza hacia arriba por una pendiente rugosa con una energía cinética de 200 joules. Cuando el libro queda momentáneamente en reposo cerca de la parte superior de la pendiente, ha ganado 180 joules de energía gravitacional potencial. ¿Cuánta energía cinética tendrá cuando regrese al punto de lanzamiento?
51. El cabrestante de su camioneta se clasifica en 600 watts. ¿Es posible hacer más de 600 joules de trabajo con este cabrestante? Explique.
52. Una compañía publicita una batería nueva, que afirma tener el doble de potencia que cualquier otra en el mercado. Si usted pusiera esta batería nueva en su linterna, ¿esperaría que la luz fuera más brillante? ¿Esperaría que durara más tiempo?
53. Cuando recibe su factura de electricidad, le cobran el número de kilowatts-hora que ha utilizado. ¿Los kilowatts-hora son una unidad de potencia o una unidad de energía?
54. Valerie es capaz de hacer 1200 joules de trabajo en 10 segundos. Brett puede hacer 5000 joules de trabajo en 50 segundos. ¿Quién aplica una potencia mayor?
55. ¿Cuál de las siguientes es una unidad de energía: newton, kilovatio, kilogramo-metro por segundo, o kilovatio-hora?
56. ¿Cuál de las siguientes no es una unidad de energía: joule, newton-metro, kilowatt-hora, o watt?

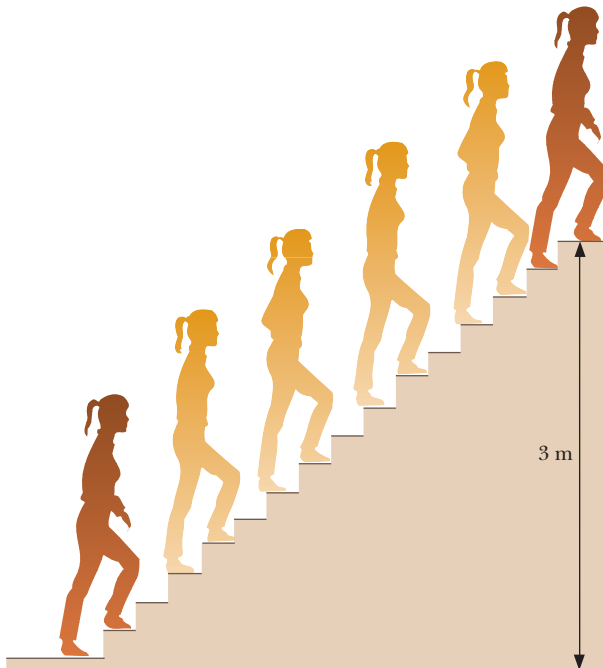
## EJERCICIOS

1. ¿Cuál es la energía cinética de una camioneta de 1800 kg que recorre un camino con una rapidez de 20 m/s?
2. ¿Cuál es la energía cinética de un velocista de 84 kg que corre a 10 m/s?
3. Al repasar su libro de laboratorio, una estudiante de física encuentra la descripción siguiente de una colisión: “Un disco de hockey de aire de 4 kg con una rapidez inicial de 6 m/s hacia la derecha chocó de frente con un disco de 1 kg que se movía a la izquierda con la misma rapidez. Después de la colisión, ambos discos viajaron a la derecha, el disco de 4 kg a 3 m/s y el disco de 1 kg a 12 m/s.” ¿Se conservó el momento en esta descripción? ¿En realidad pudo haber ocurrido esta colisión tal como se describe?
4. Al revisar su libro de laboratorio, un estudiante de física encuentra la descripción siguiente de una colisión: “Un disco de hockey de aire de 4 kg con una rapidez inicial de 6 m/s hacia la derecha chocó de frente con un disco de 1 kg que se movía a la izquierda con la misma rapidez.

Después de la colisión, ambos discos viajaron a la derecha, el disco de 4 kg a 2 m/s y el disco de 1 kg a 10 m/s.” ¿Se conservó el momento en esta descripción? ¿Se conservó la energía cinética en esta descripción? ¿En realidad pudo haber ocurrido esta colisión tal como se describe?

5. Un coche de juguete de 4 kg con una rapidez de 5 m/s choca de frente con un automóvil inmóvil de 1 kg. Después de la colisión, los vehículos quedan atorados con una rapidez de 4 m/s, ¿cuánta energía cinética se perdió en la colisión?
6. Un automóvil de juguete de 3 kg con una rapidez de 6 m/s choca de frente con un coche de 2 kg que viaja en la dirección opuesta con una rapidez de 4 m/s. Si los vehículos quedan atorados después de la colisión con una rapidez de 2 m/s, ¿cuánta energía cinética se perdió en la colisión?
7. Un disco de hockey de aire de 0.5 kg está inicialmente en reposo. ¿Cuál será su energía cinética después que una fuerza neta de 0.7 N actúa sobre él durante una distancia de 3 m?

8. Un bloque de 40 N levantado directamente hacia arriba con una mano que aplica una fuerza de 40 N tiene una energía cinética inicial de 12 J. Si el bloque se levanta 0.5 m, ¿cuánto trabajo efectúa la mano? ¿Cuál es la energía cinética final del bloque?
9. Un automóvil controlado por radio aumenta su energía cinética de 5 a 27 J sobre una distancia de 2 m. ¿Cuál fue la fuerza neta promedio del vehículo durante este intervalo?
10. Un automóvil de juguete tiene una energía cinética de 12 J. ¿Cuál es su energía cinética después que una fuerza friccional de 0.8 N actúa sobre él durante 4 m?
11. La Tierra, que orbita el Sol en una trayectoria elíptica, alcanza su punto más cercano al Sol cerca del 4 de enero cada año. ¿El trabajo efectuado por la fuerza gravitacional del Sol sobre la Tierra será positivo, negativo, o cero, durante los 6 meses siguientes? ¿Y durante el año siguiente?
12. ¿Cuánto trabajo aplica la fuerza gravitacional sobre un satélite que está en una órbita cercana a la Tierra durante una revolución?
13. ¿Cuánto trabajo realiza una persona de 55 kg contra la gravedad al ascender por un sendero cuya elevación aumenta 720 m?
14. Una mujer con una masa de 65 kg asciende por unas escaleras de 3 m de altura. ¿Cuánta energía gravitacional potencial gana?



15. Se lanza una pelota de béisbol (masa = 145 g) directo hacia arriba con una energía cinética de 8.7 J. Cuando la pelota se ha elevado 6 m, determine: (a) el trabajo realizado por la gravedad, (b) la energía cinética de la pelota, y (c) la rapidez de la pelota.
16. ¿Cuál es la energía gravitacional potencial de una pelota con un peso de 50 N cuando está en un anaquel a 1.5 m sobre el suelo? ¿Qué necesita suponer para obtener su respuesta?
17. Si se deja caer una pelota de 0.5 kg desde una altura de 6 m, ¿cuál es su energía cinética cuando choca con el suelo?
18. Se suelta un bloque de 2 kg que está en reposo en la parte superior de una rampa de 20 m de longitud sin fricción que está a 4 m de altura. Al mismo tiempo, se suelta un bloque idéntico junto a la rampa, de modo que cae directo hacia abajo los mismos 4 m. ¿Cuáles son los valores de cada uno de los siguientes conceptos para los bloques justo antes que lleguen a nivel del suelo? ¿Cuáles cantidades son iguales para los dos bloques?
  - a. energía gravitacional potencial
  - b. energía cinética
  - c. rapidez
  - d. momento
19. Una montaña rusa de 1200 kg sin fricción comienza en reposo a una altura de 24 m. ¿Cuál es su energía cinética cuando asciende una colina que tiene 12 m de altura?
20. Usted se asoma por una ventana del segundo piso que está 5 m sobre la acera y lanza una pelota de 0.1 kg directo hacia arriba con una energía cinética de 6 J.
  - a. ¿Cuál es la energía gravitacional potencial de la pelota cuando la suelta?
  - b. ¿Cuál es la energía gravitacional potencial de la pelota justo antes de chocar con la acera?
  - c. ¿Cuál es la energía cinética de la pelota justo antes de golpear la acera?
  - d. ¿Cómo cambiaría la respuesta a la parte (c) si la pelota hubiera sido lanzada inicialmente directo hacia abajo con 6 J de energía cinética?
21. ¿Cuál potencia promedio necesita un levantador de pesas para levantar 300 lb una distancia de 4 pies en 0.8 s?
22. Si un velocista de 80 kg puede acelerar desde un comienzo inmóvil a una rapidez de 10 m/s en 3 s, ¿cuál potencial promedio se genera?
23. Si un reproductor de CD utiliza electricidad a una tasa de 15 W, ¿cuánta energía utiliza durante un periodo de 8 h?
24. Si una secadora de cabello tiene una clasificación de 800 W, ¿cuánta energía requiere en 3 min?



# 7 Rotación



© Royalty-Free/Cortis

En el movimiento de traslación, los objetos tienen momento. En el movimiento de rotación, los objetos también tienen momento. Se requiere una fuerza neta para cambiar el momento lineal de un objeto. ¿Qué provoca un cambio en el momento de rotación de un objeto? Por ejemplo, ¿por qué un helicóptero tiene un pequeño rotor en la parte trasera?

*Los helicópteros son útiles para combatir los incendios forestales.*

---

(Consulte la respuesta a esta pregunta en la página 128.)

---

Un balón de fútbol americano bien lanzado sigue una trayectoria de proyectil mientras gira sobre su eje largo. El movimiento del balón es fácil de analizar porque el giro no afecta la trayectoria y la trayectoria no afecta el giro. Es decir, el movimiento de rotación sobre el eje es independiente del movimiento por el aire.

En este capítulo, examinamos el movimiento de rotación sin examinar ningún movimiento de traslación relacionado.

## Movimiento de rotación

Las reglas para el movimiento de rotación tienen muchas analogías con el movimiento de traslación. La distancia recorrida ya no se mide en unidades de distancia comunes como pies o metros, sino en una medida angular, como grados, revoluciones, o radianes. Igual que los pies y los metros pueden convertirse entre sí, estas medidas angulares se relacionan mediante factores de conversión sencillos. Existen 360 grados en un círculo completo, de modo que 1 grado es igual a  $\frac{1}{360} \cong 0.0028$  revoluciones. Es posible que no haya encontrado el radián; se define como el ángulo por el cual la longitud del arco a lo largo del círculo es igual al radio del círculo. El dibujo de la figura 7-1 exhibe el tamaño del radián. Hay  $2\pi \cong 6.28$  radianes en un círculo completo. De modo que un radián es un poco más grande de 57 grados.

Igual que la rapidez de traslación  $v$  es el desplazamiento (el cambio en la posición) dividido entre el tiempo requerido, la **rapidez de rotación**  $\omega$  es el desplazamiento angular (el cambio en la posición angular) dividido entre el tiempo requerido. Las unidades utilizadas para expresar esta medida pueden ser radianes por segundo o revoluciones por minuto (rpm). Un disco compacto (CD) moderno gira con una frecuencia de entre 500 y 200 revoluciones por minuto, conforme se reproduce desde la pista interior hasta la pista exterior.

La **aceleración de rotación**  $\alpha$  es una medida de la frecuencia con la que cambia la rapidez de rotación. El cambio en la rapidez de rotación es igual a la rapidez de rotación final menos la rapidez de rotación inicial. Si un CD contiene 60 minutos de música, su aceleración de rotación promedio es

$$\alpha = \frac{\Delta\omega}{\Delta t} = \frac{200 \text{ rpm} - 500 \text{ rpm}}{60 \text{ min}} = -5 \frac{\text{rpm}}{\text{min}}$$

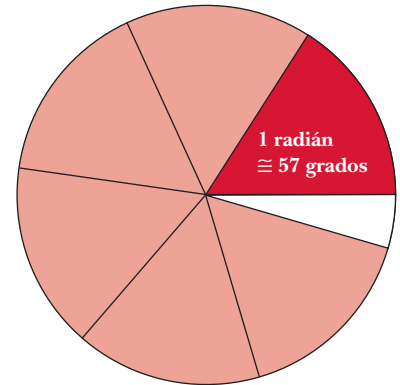
Debido a que el CD disminuye su rapidez, este cambio es negativo. En este ejemplo, la rapidez de rotación del CD se reduce 5 revoluciones por minuto por cada minuto de música.

Igual que la velocidad y la aceleración de traslación, la **velocidad de rotación** y la aceleración de rotación son vectores. La asignación de direcciones a estos vectores de rotación no es tan obvia como para sus contrapartes de traslación. Las únicas direcciones asociadas con un cuerpo que gira y que no cambian de manera continua son las del eje de rotación. Por lo tanto, asignamos que la dirección de la velocidad de rotación sea sobre el eje de rotación. Por convención, si usted dobla los dedos de su *mano derecha* sobre la dirección de rotación, como se aprecia en la figura 7-2, su pulgar apunta sobre el eje en la dirección de la velocidad de rotación.

La dirección de la aceleración de rotación también es sobre el eje de rotación. Si la aceleración provoca que el objeto aumente su rapidez, la dirección de la aceleración es igual que la de la velocidad. Si la aceleración hace que el objeto vaya más lento, la aceleración apunta en la dirección opuesta a la velocidad.

## Torsión

La primera ley de Newton tiene la misma forma para el movimiento de rotación que para el movimiento de traslación. La primera ley afirma que, en ausencia de una interacción externa neta, el movimiento natural es aquel en el cual la velocidad de rotación permanece constante. Si el objeto no gira, se mantiene sin girar. Si el objeto gira, sigue girando con la misma velocidad de rotación.



**Figura 7-1** Hay poco más de  $6\frac{1}{4}$  radianes en un círculo completo.



**Figura 7-2** Si usted dobla los dedos de su mano derecha sobre la dirección del movimiento, su pulgar apunta sobre el eje en la dirección de la velocidad de rotación.

### ✓ MATEMÁTICAS

✓ El suplemento *Problem Solving* (Solución de problemas) ofrece una presentación extendida.

Sólo puede ocurrir un cambio en la rapidez de rotación cuando existe una interacción externa neta sobre el objeto. Esta interacción implica fuerzas, pero a diferencia del movimiento de traslación, los lugares en los cuales actúan las fuerzas son tan importantes como sus magnitudes y direcciones. La misma fuerza puede producir efectos diferentes, dependiendo de dónde y en cuál dirección se aplica.

Usted puede experimentar con estas ideas al aplicar diferentes fuerzas sobre la puerta de su habitación. Si empuja directamente hacia las bisagras, la puerta no gira. Sólo ocurren rotaciones cuando se aplica una fuerza horizontal en cualquier otra dirección; la más grande ocurre cuando la fuerza es perpendicular a la cara de la puerta.

Incluso cuando aplica la fuerza en dirección perpendicular, obtiene resultados distintos, dependiendo de donde empuja. Trate de abrir la puerta al empujarla a diferentes distancias de las bisagras. El efecto más grande ocurre cuando la fuerza se aplica a la máxima distancia de las bisagras. Por esa razón se instalan ahí los pomos de las puertas.

### FÍSICA | HÁGALO USTED MISMO

Un niño pequeño pueden vencerlo fácilmente en el juego de “empujar” la puerta si usted elige con cuidado los puntos donde cada uno empuja. Descubra dónde debe establecer los puntos.

El análogo de la fuerza de rotación se llama **torsión** y combina los efectos de la fuerza sobre la puerta y la distancia desde las bisagras. Si usted empuja sobre el pomo de la puerta, éste se mueve sobre una trayectoria circular con un radio igual a la distancia de la bisagra al pomo, como se observa en la figura 7-3. Si nos limitamos al caso en que la fuerza es perpendicular al radio, la magnitud de la torsión  $\tau$  es igual al radio  $r$  multiplicado por la fuerza  $F$ :

$$\text{torsión} = \text{radio} \times \text{fuerza} \rightarrow$$

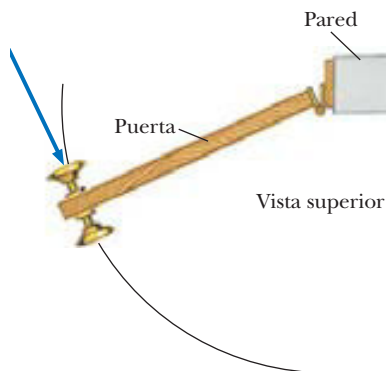
$$\tau = rF$$

Aunque hallaremos que la torsión es un vector que se ubica sobre el eje de rotación, para nosotros es más fácil describir una torsión por el efecto que tiene al girar un objeto que al inicio estaba inmóvil. Si el objeto gira en sentido dextrógiro, decimos que la torsión es dextrógiro.

El desarrollo del concepto de torsión nos permite replantear la primera ley de Newton para la rotación:

primera ley de Newton  $\rightarrow$   
para la rotación

La velocidad angular de un objeto se mantiene constante, a menos que actúe sobre él una torsión desequilibrante.



**Figura 7-3** La torsión que actúa sobre la puerta es igual al producto de la distancia desde la bisagra y la fuerza aplicada al pomo de la puerta.

Para que un vector permanezca constante, su magnitud y su dirección deben permanecer constantes.

Debido a que la torsión es igual a un producto, podemos apreciar por qué la misma fuerza aplicada puede producir torsiones diferentes sobre un objeto. La torsión aumenta si la fuerza se aplica más lejos del eje de rotación. Este hecho es útil si usted tiene que aflojar una tuerca empecinada. La torsión más grande ocurre cuando usted impulsa o atrae la llave en el punto más lejano de la tuerca. Podemos hacer más larga la distancia (para las tuercas verdaderamente empecinadas) al deslizar un tubo sobre la llave.

Imagine que tiene un neumático desinflado y una de las tuercas está atorada. Suponga además que su llave mide 0.3 metro de longitud. ¿Qué magnitud tendría la torsión si usted se para en el extremo de la llave?

Si usted pesa 500 newtons (110 libras), la torsión máxima que puede aplicar sería 150 newtons-metro:

$$\tau = rF = (0.3 \text{ m})(500 \text{ N}) = 150 \text{ N} \cdot \text{m}$$



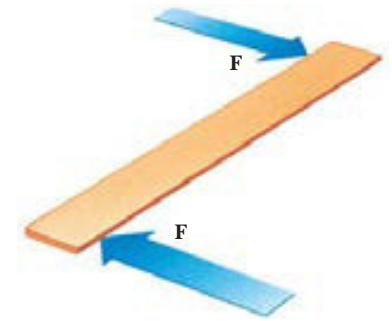
**Pregunta** Suponga que esto no es suficiente, pero en su automóvil encuentra un tubo que puede deslizar sobre la llave, y triplicar la longitud efectiva. ¿Cuál torsión puede aplicar ahora?

**Respuesta** Debido a que la torsión es un producto de la fuerza y la distancia, obtendría la torsión que es tres veces más grande que el original, o 450 newtons-metros.

Cuando se aplica más de una fuerza, surgen situaciones en las que la fuerza neta es cero, pero la torsión neta es diferente de cero. En otras palabras, un par de fuerzas que no produce una aceleración de traslación todavía pueden producir una aceleración de rotación. Las dos fuerzas en la tabla de la figura 7-4 tienen la misma magnitud y direcciones opuestas, pero no actúan sobre la misma línea. La tabla acelera en sentido dextrógiro porque las tensiones respecto al centro de la tabla son diferentes de cero y actúan en la misma dirección de rotación.

La figura 7-5 presenta dos niñas en un subibaja. El peso de cada niña multiplicado por su distancia desde el eje produce la tensión que ella aplica al juego. Si las tensiones tienen la misma magnitud y dirección, no habrá una aceleración de rotación. Por supuesto, si esto ocurriera, sería aburrido jugar en un subibaja. El movimiento del subibaja se alterna entre dos rotaciones: primero en una dirección, y luego en la otra. La torsión momentánea que produce la transición de una dirección a la otra proviene de cuando una niña se empuja del suelo con sus pies.

Dos personas con pesos diferentes todavía son capaces de equilibrar el subibaja. La persona que pesa menos se sienta más lejos del eje, como en la figura 7-6. Esto iguala la torsión. La distancia adicional compensa la menor fuerza generada por el peso menor.



**Figura 7-4** Dos fuerzas iguales pero opuestas pueden producir una aceleración de rotación si no actúan sobre la misma línea.



© David Rogers

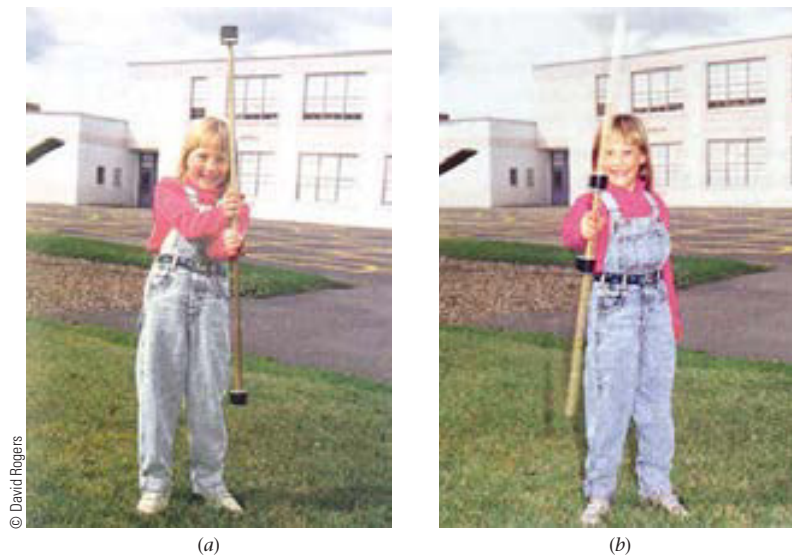
**Figura 7-5** Si un subibaja está equilibrado, la torsión que ejercen las dos niñas son iguales.



© David Rogers

**Figura 7-6** La persona que pesa más se sienta más cerca del eje para igualar la torsión.

**Figura 7-7** (a) Dos masas sujetas cerca de los extremos de un metro rígido tienen una inercia de rotación grande. (b) Cuando las masas se acercan al centro, la inercia de rotación es bastante menor.



## Inercia de rotación

### ✓ MATEMÁTICAS

La aceleración de rotación depende de los objetos, al igual que la torsión neta. Si usted empuja la puerta de la bodega de un banco y una puerta de su casa, obtiene aceleraciones de rotación diferentes. En caso de la traslación, la misma fuerza neta genera aceleraciones diferentes para masas inerciales diferentes. En el caso de la rotación, la misma torsión neta produce aceleraciones de rotación distintas, pero ahora la aceleración depende más de la masa del objeto; la distribución de la masa también es importante.

Considere una pesa preparada con un metro rígido y masas de  $\frac{1}{2}$  kilogramo sujetas en cada extremo. Al sostener la pesa por el centro y moverla hacia delante y hacia atrás comprueba de manera convincente que se requiere una torsión grande para producir una aceleración de rotación sustancial (figura 7-7[a]). Esto es completamente análogo a las propiedades inerciales de la traslación que hemos encontrado. El análogo de rotación de la inercia es la **inercia de rotación**.

Un cambio en la disposición produce resultados distintos. Si las dos masas se acercan al centro de la pesa, es mucho más fácil iniciar y detener la rotación (figura 7-7[b]). La pesa tiene menos inercia de rotación aunque no se haya quitado masa. Sencillamente el cambio en la distribución de la masa modificó la inercia de rotación; es más grande entre más lejos está la masa del punto de rotación.

La segunda ley de Newton para el movimiento de rotación es similar a la del movimiento de traslación,  $F_{\text{net}} = ma$ , en donde la torsión neta  $\tau$  sustituye a la fuerza neta  $F$ , la inercia de rotación  $I$  sustituye a la masa  $m$ , y la aceleración de rotación  $\alpha$  sustituye a la aceleración de traslación  $a$ :

$$\tau_{\text{net}} = I\alpha$$

torsión neta = inercia de rotación  $\times$   
aceleración de rotación

segunda ley de Newton  $\rightarrow$   
para la rotación

La torsión neta sobre un objeto es igual a su inercia de rotación por su aceleración de rotación.

Igual que la aceleración de traslación siempre debe apuntar en la misma dirección que la fuerza neta que la produce, la aceleración de rotación siempre debe apuntar en la misma dirección que la torsión neta. Por lo tanto, la torsión neta debe estar sobre el eje de rotación.

La pérdida del equilibrio en el alambre significa aumentar la rotación fuera del alambre. Los equilibristas aumentan su inercia de rotación al llevar pértigas largas. Su mayor inercia de rotación les ayuda a mantener el equilibrio porque les da más tiempo para reaccionar. De manera natural, hacemos lo mismo cuando intentamos mantener el equilibrio. Imagínese a sí mismo cuando camina sobre un riel de ferrocarril. ¿Dónde están sus brazos?



## Razonamiento defectuoso



Un grupo de ingenieros diseña una máquina. En un lugar en la máquina, un motor hace girar un engrane grande sobre un eje. El engrane grande se sincroniza con un engrane pequeño que gira sobre su propio eje, como en la figura 7-8. Los ingenieros discuten acerca de las presiones que los engranes ejercen entre sí.

**Seth:** “El engrane grande aplicará una torsión más grande sobre el pequeño de lo que éste ejercerá a su vez sobre el engrane grande, en virtud de su tamaño.”

**Jason:** “Tienes razón en parte. El engrane grande aplica una torsión más grande, pero no por su tamaño. El engrane grande está conectado al motor. Impulsa al engrane pequeño, de modo que debe aplicar una torsión más grande.”

**Roger:** “Los dos olvidan la tercera ley de Newton. La fuerza que ejerce el engrane pequeño sobre el grande es igual y opuesta a la fuerza que ejerce el engrane grande sobre el pequeño, así que las torsiones que ejercen entre sí también deben ser iguales.”

**Jane:** “La tercera ley de Newton se aplica a las *fuerzas*, pero no a las *torsiones*. Aunque las fuerzas que ejercen los engranes entre sí deben ser iguales y opuestas, la fuerza que el engrane pequeño ejerce sobre el grande actúa más lejos del eje, de modo que el engrane pequeño en realidad aplica una torsión más grande.”

**¿Cuál de estos ingenieros debe ser el líder del proyecto?**

**Respuesta** Esperamos que Jane dirija el proyecto. Comprende que la tercera ley de Newton se aplica siempre que interactúan dos objetos, pero que *fuerzas* iguales y opuestas no significan *torsiones* iguales y opuestas. Como la torsión es el producto de la fuerza y la distancia desde el eje de rotación, la fuerza que actúa más lejos del eje producirá la torsión más grande. Este principio vuelve útiles los engranes. Observe que aunque existe un análogo de rotación para la primera y la segunda ley de Newton, no existe tal análogo para la tercera ley de Newton.



© David Rogers

Los brazos extendidos ayudan a los niños a mantener el equilibrio sobre un riel de ferrocarril abandonado.



**Figura 7-8** ¿Cuál engrane aplica la torsión más grande?

## Centro de la masa

Si reducimos mentalmente cualquier objeto para que toda su masa se ubique en cierto punto, el movimiento de traslación de este objeto nuevo y muy compacto sería igual al del objeto original. Además, si el objeto original gira libremente, lo hace respecto al mismo punto. Este punto se llama el **centro de la masa**.

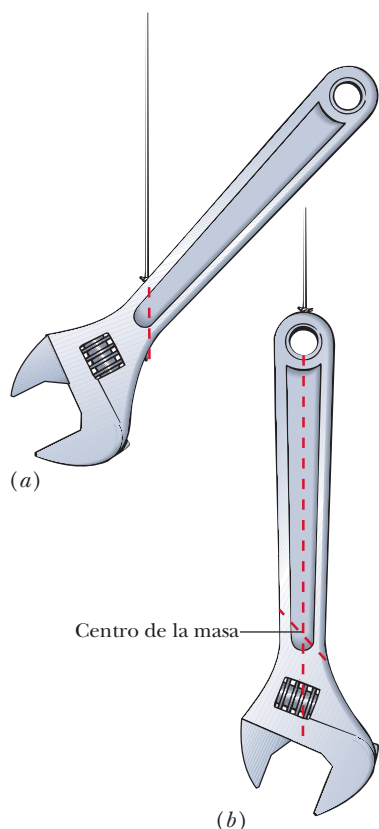
El concepto de centro de la masa también es útil para examinar el efecto de la gravedad sobre los objetos. En lugar de enfrentar una cantidad de fuerzas increíblemente grande que actúan sobre el objeto, tratamos el objeto como si la fuerza total (es decir, su peso) actuara en el centro de la masa. Al hacer esto, podemos explicar los movimientos de traslación y de rotación del objeto.

Ahora necesitamos un modo para determinar el centro de la masa. Esto puede determinarse mediante un procedimiento de promedios matemáticos que consideren la distribución de la masa del objeto. Cierta cantidad de masa en un lado del objeto se equilibra, o promedia, con cierta masa en el otro lado. Pero existen modos más sencillos.

Hallar el centro de la masa para un objeto con una forma regular es bastante sencillo. La simetría de los objetos nos dice que el centro de la masa debe estar en el centro geométrico del objeto. Es interesante observar que no tiene que existir ninguna masa en ese punto; el centro de la masa hueco de una pelota de tenis todavía es su centro geométrico.

**Pregunta** ¿Dónde esperaría que estuviera el centro de la masa de una rosquilla?

**Respuesta** Debido a que la rosquilla es aproximadamente simétrica, su centro de la masa está cerca del centro del hueco.



**Figura 7-9** El centro de la masa de la llave está en la intersección de las líneas verticales obtenidas al colgar la llave de dos o más lugares.

La localización del centro de la masa de un objeto con forma irregular es un poco más difícil. Sin embargo, como se considera que el peso actúa en el centro de la masa, podemos ubicarlo con un experimento sencillo. Suelte el objeto desde un punto en la orilla de su superficie para que se balancee libremente, igual que en la figura 7-9 (a). El objeto quedará en reposo en una posición donde ninguna torsión actúe sobre él. En esta posición el peso actúa sobre una línea vertical a través del punto de apoyo. Por tal razón, el centro de la masa está en algún lugar sobre esta línea vertical. Ahora cuelgue el objeto de otro punto, y establezca una segunda línea. Debido a que el centro de la masa debe estar sobre ambas líneas, se ubica en la intersección de las dos líneas (figura 7-9[b]).

## Razonamiento defectuoso



Roger encuentra el centro de la masa de un bate de béisbol al equilibrarlo sobre su dedo. Después corta el bate en dos en el lugar del centro de la masa. Espera que las masas de los dos pedazos sean idénticas, porque la ubicación promedio de la masa debe tener la mitad de la masa en un lado y la mitad en el otro. Pero cuando sopesa los dos pedazos, es evidente que uno es más pesado que el otro.

**¿Qué error cometió Roger en su razonamiento?**

**Respuesta** El centro de la masa del bate no siempre es la ubicación promedio de su masa. Es un *promedio ponderado*, igual al cálculo de su GPA. Debido a que el bate se equilibra en el centro de la masa, la torsión que ejerce el peso del extremo grueso del bate respecto a este eje debe equilibrar la torsión que ejerce el extremo delgado respecto a este eje. Como la masa en el extremo grueso está más cerca del eje, la fuerza gravitacional que actúa sobre éste debe ser mayor. Por lo tanto, el extremo grueso pesa más que el extremo delgado.

## FÍSICA | HÁGALO USTED MISMO

Intente adivinar la ubicación del centro de su estado natal. Puede corroborar su suposición al fijar un mapa de su estado sobre un cartón. Después de cortar los bordes del estado, cuélguelo desde varios puntos, como se aprecia en la figura 7-10, para localizar su centro.

**Figura 7-10** El centro del estado de Vermont se localiza al colgarlo desde dos puntos.



(a)



(b)

## Estabilidad

Podemos extender nuestras ideas acerca de los objetos que giran para observar por qué algunas cosas se vuelcan fácilmente y otras son muy estables. Imagine que un niño hace una torre alta con muchos bloques de juguete. Para regocijo del niño, la torre siempre se vuelca. ¿Por qué ocurre esto? Es evidente que en el mundo hay estructuras más altas que esta torre infantil.

Respondemos esto al analizar la estabilidad de una torre con un bloque. En la figura 7-11 (a), el lado izquierdo del bloque está ligeramente arriba de la mesa. Si lo soltamos en esta posición, el peso del bloque (que actúa como el centro de la masa) aporta una torsión levógira sobre el lado derecho. La fuerza de la mesa sobre el bloque actúa sobre esta orilla, pero no produce una torsión porque funciona como el eje. Por lo tanto, una torsión neta es levógira y el bloque regresa a su posición original.

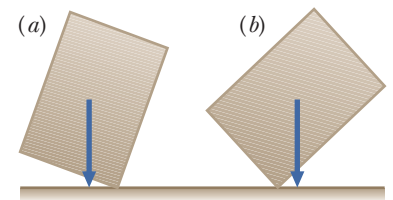
En la figura 7-11 (b), el bloque está inclinado lo suficiente para que el peso actúe hacia la derecha del eje. El peso produce una torsión dextrógira y el bloque cae de lado. El bloque se vuelca cada que el centro de su masa está más allá de la orilla de la base.

Conforme la torre del niño se hace más alta y el centro de la masa se ubica más arriba, disminuye la magnitud que la torre debe balancear antes que el centro de la masa llegue más allá de la base. Podemos hacer más estable la torre al mantenerla corta, al ampliar su base, o ambas cosas.

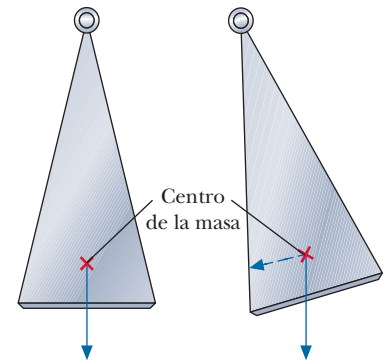
Si usted recibe un empujón mientras está de pie con los pies juntos, comienza a caerse. Para detener esto, separa rápido los pies y aumenta su base de apoyo. Los fabricantes de automóviles promueven las superficies de neumáticos muy anchas, porque esta innovación hace más estable el vehículo.

Es difícil caminar por el alambre porque la base de apoyo (el grosor del alambre) es muy pequeña. Una ligera inclinación hacia la izquierda o la derecha coloca el centro de la masa más allá del punto de apoyo y crea una torsión. La torsión produce una rotación en la misma dirección que la inclinación inicial, lo cual empeora la situación. Tal situación se conoce como **equilibrio inestable**.

La disposición más estable ocurre cuando el centro de la masa está bajo el punto de apoyo, igual que en la figura 7-12. Conforme el centro de la masa se balancea a la izquierda o la derecha, la torsión creada gira el objeto de regreso a su orientación original. Esta situación se conoce como **equilibrio estable**.



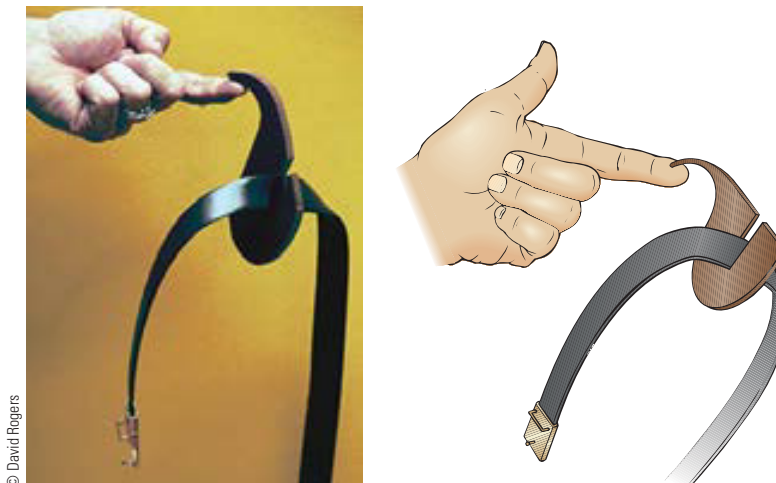
**Figura 7-11** (a) Cuando el centro de la masa está encima de la base, el bloque regresa a su posición vertical. (b) Cuando el centro de la masa está más allá de la base, el bloque se vuelca.



**Figura 7-12** Ocurre un equilibrio estable cuando el centro de la masa está bajo el punto de suspensión.

### FÍSICA | HÁGALO USTED MISMO

Corte un pedazo de madera en la forma que se observa en la figura 7-13. Trate de apoyar el gancho colgante sobre sus dedos, tal como se indica. Vuelva a intentar esto después de haber insertado un cinturón rígido en la ranura, igual que en la figura. ¿Dónde está el centro de la masa del gancho y el cinturón?



**Figura 7-13** El centro de la masa del gancho colgante y el cinturón está directamente bajo el eje.

## Energía cinética de rotación

Si arrojamamos un yoyo hacia el piso, acelera conforme la energía gravitacional potencial se convierte en energía cinética. Si, en lugar de eso, sostenemos la cuerda mientras el yoyo cae, el yoyo no acelera tan rápido. Sólo una parte de la energía gravitacional potencial perdida se ha convertido en la energía cinética de traslación del centro de la masa. Debido a que se conserva la energía total, el resto debe haberse convertido a una nueva forma de energía. Esta nueva forma se asocia con el movimiento de giro del yoyo respecto a su centro de la masa y se conoce como **energía cinética de rotación**.

La energía cinética de rotación del yoyo se calcula al tratarlo como si fuera millones de pedazos conectados. Si aplicamos la fórmula para la energía cinética lineal,  $KE = \frac{1}{2}mv^2$ , para cada pedazo y sumamos todas sus contribuciones, hallaremos que el total adopta una forma muy familiar. Mientras que la energía cinética lineal depende de la inercia lineal (la masa) y el cuadrado de la rapidez lineal, la energía cinética de rotación depende de la inercia de rotación  $I$  y del cuadrado de la rapidez de rotación  $\omega$ :

energía cinética de rotación ➤

$$KE_{\text{rotación}} = \frac{1}{2} I \omega^2$$

Igual que para la energía cinética de traslación, la cantidad no es un vector; no se asocia una dirección con la energía cinética de rotación. Debido a que es una energía, las unidades para la energía cinética de rotación son joules.

Igual que la energía cinética de rotación, el yoyo puede convertirse a otras formas de energía, la energía cinética de rotación guardada en los volantes de inercia sirve para hacer más eficiente el uso del combustible de los automóviles o los camiones. Cuando el vehículo frena para detenerse, la energía cinética de traslación sirve para hacer girar un volante de inercia pesado. Después, cuando la luz cambia a verde, este volante de inercia giratorio sirve para acelerar el vehículo. En las tres secciones siguientes encontraremos que construir un automóvil con un solo volante de inercia tendría efectos desastrosos. En la práctica, necesitamos usar dos volantes de inercia idénticos, que giran en direcciones opuestas a la misma velocidad.

## Momento angular

Existe otro tipo de momento en el cual un objeto que orbita un punto tiene una cantidad de movimiento de *rotación*, que es diferente del momento lineal. Esta nueva cantidad se llama **momento angular** y se representa con la letra  $L$ . En este ejemplo, la magnitud del momento angular es igual al momento lineal del objeto multiplicado por el radio  $r$  de su trayectoria circular:

momento angular = momento  
lineal  $\times$  radio ➤

$$L = mvr$$

Un objeto que gira también tiene un momento angular, porque en realidad es sólo un conjunto grande de partículas diminutas, cada una de las cuales gira sobre el mismo eje. El momento angular total de un objeto que gira es sólo la suma de los momentos angulares individuales de las partículas individuales. Encontramos que el momento angular del objeto que gira es igual al producto de su inercia de rotación  $I$  y su rapidez de rotación  $\omega$ :

momento angular = inercia de  
rotación  $\times$  rapidez de rotación ➤

$$L = I\omega$$

lo cual es similar a la expresión para el momento lineal,  $p = mv$ , en donde el momento angular  $L$  reemplaza el momento lineal  $p$ , la inercia de rotación  $I$  reemplaza la masa  $m$ , y la velocidad de rotación  $\omega$  reemplaza la velocidad de traslación  $v$ .

La Tierra tiene ambos tipos de momentos angulares: el momento angular debido a su revolución anual alrededor del Sol y el debido a su rotación diaria sobre su eje.

## Conservación del momento angular

El momento angular de un sistema no cambia bajo ciertas circunstancias. La ley de la **conservación del momento angular** es similar a la ley de la conservación del momento lineal. La diferencia es que la interacción que cambia el momento angular es una torsión y no una fuerza.

Si la torsión externa neta de un sistema es cero, el momento angular total del sistema no cambia.

Observe que la torsión externa neta necesita ser diferente de cero para que se conserve el momento angular. Puede haber una fuerza neta externa que actúe sobre el sistema, siempre y cuando la fuerza no produzca una torsión. Este es el caso para el movimiento de proyectil porque se puede considerar que la fuerza de gravedad actúa en el centro de la masa del objeto. Por lo tanto, aunque un bastón lanzado siga una trayectoria de proyectil, continúa girando con el mismo momento angular alrededor de su centro de la masa. No existe una torsión neta sobre el bastón.

Hay algunas situaciones interesantes en las cuales se conserva el momento angular de un objeto que gira, pero cambia la rapidez de rotación del objeto. Cerca del final de su actuación, muchos patinadores en hielo hacen un giro, el cual suele comenzar lento y después se vuelve cada vez más rápido. Esto puede parecer una violación de la ley de la conservación del momento angular, pero de hecho es un hermoso ejemplo de su validez.

El momento angular es el producto de la inercia de rotación y la rapidez de rotación y, en ausencia de una torsión neta, se mantiene constante. Por lo tanto, si disminuye la inercia de rotación, la rapidez de rotación debe aumentar. Esto es exactamente lo que ocurre. El patinador suele comenzar con los brazos extendidos. Conforme acerca sus brazos al cuerpo, disminuye la inercia de rotación del cuerpo, porque la masa de los brazos ahora está más cerca del eje de rotación. Esto exige que aumente la rapidez de rotación. Para frenar el giro, el patinador invierte el procedimiento al extender los brazos para aumentar la inercia de rotación.

### FÍSICA | HÁGALO USTED MISMO

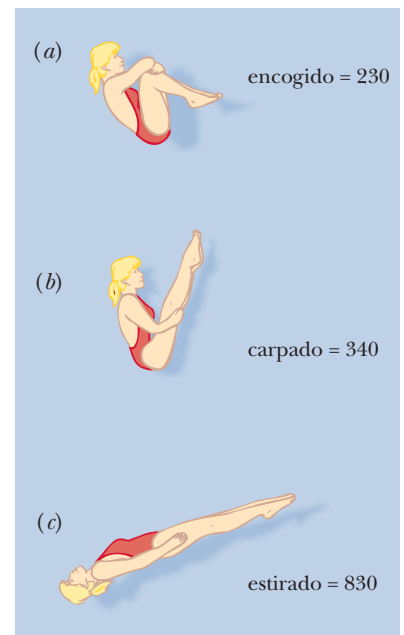
Siéntese en un banco giratorio, comience a girar lentamente con sus brazos extendidos, y luego acerque sus brazos al cuerpo. ¿Por qué aumenta su rapidez de rotación? Puede aumentar el efecto al sostener una masa grande en cada mano.

Se aplica el mismo principio a las vueltas y giros de los gimnastas y los clavadistas. La velocidad de rotación y, por lo tanto, la cantidad de saltos mortales que pueden realizar, depende de la inercia de rotación del cuerpo, al igual que del momento angular de la altura generada durante el despeque. Los dibujos de la figura 7-14 ofrecen los valores relativos de la inercia de rotación para las posiciones encogido, carpado y estirado. El encogido más compacto tiene la inercia de rotación más baja y, por lo tanto, la rapidez de rotación más alta.

**Pregunta** Imagine que ejecuta un salto mortal con carrera al frente, cuando de repente comprende que no gira con suficiente rapidez para que sus pies queden en posición. ¿Qué puede hacer?

**Respuesta** Puede apretar su encogido para reducir su inercia de rotación. Debido a que el momento angular se conserva, girará más rápido.

◀ conservación del momento angular



**Figura 7-14** Valores relativos de la inercia de rotación para las posiciones: (a) encogido, (b) carpado, (c) estirado.





© Agence Nature / Photostock / Tony Campbell

**Figura 7-15** Fotografías estroboscópicas de un gato que cae.

Los gatos tienen una sorprendente habilidad para aterrizar de pie, sin tomar en cuenta su orientación inicial. Las fotografías estroboscópicas modernas (figura 7-15) han demostrado que el gato no adquiere una rotación por medio de patadas. El momento angular inicial del gato es cero. Debido a que la fuerza de gravedad actúa como el centro de la masa del gato, no produce una torsión, y el momento angular sigue siendo cero.

El gato gira al voltear los extremos frontal y posterior de su cuerpo en diferentes direcciones. Todo el gato tiene un momento angular cero, siempre y cuando los momentos angulares de las dos partes sean iguales y opuestos. Aunque estos momentos angulares tienen la misma magnitud, la magnitud de la rotación puede ser diferente, porque depende de la inercia de rotación de esa parte del cuerpo. El gato ajusta la inercia de rotación al retraer y extender sus patas.

Cuando la Tierra se mueve sobre su órbita, de manera continua es atraída hacia el Sol. Como la fuerza gravitacional siempre actúa hacia el Sol, no hay una torsión neta que afecte el movimiento de la Tierra alrededor del Sol. Por lo tanto, debe conservarse el momento angular orbital de la Tierra. Tal como lo descubrió Kepler, la órbita de la Tierra alrededor del Sol no es un círculo, sino una elipse. De manera que la Tierra no siempre está a la misma distancia del Sol. Esto significa que cuando la Tierra está más cerca del Sol, su rapidez es mucho más alta para conservar constante el momento angular. Asimismo, la rapidez de la Tierra debe ser menor cuando está más lejos del Sol.

El Sistema Solar comenzó como una enorme nube de gases y polvo que tenía una rotación muy pequeña como parte de su movimiento general respecto al centro de la galaxia. Cuando se colapsó bajo su atracción gravitacional mutua, giró cada vez más rápido de acuerdo con la conservación del momento angular. Esto explica por qué todos los planetas giran alrededor del Sol en la misma dirección y por qué la rotación del Sol mismo también es en esta dirección.

### Momento angular: Un vector

Igual que el momento lineal, el momento angular es una cantidad de vector. La conservación de una cantidad de vector significa que son constantes la magnitud y la dirección. Existen algunas consecuencias interesantes de conservar la dirección del momento angular. La dirección del momento angular es igual que la de la velocidad de rotación; es decir, se ubica sobre el eje de rotación.

Una aplicación importante de este principio es el uso de un giroscopio para guiar aviones y naves espaciales. Un giroscopio es sencillamente un disco que gira rápidamente sobre un eje. El eje está montado de modo que puedan girar en cualquier dirección sin aplicar una torsión sobre el disco giratorio (figura 7-16). Una vez

**Figura 7-16** Un giroscopio rotatorio conserva su dirección en el espacio aunque gire su base.



© David Rogers



que el giroscopio da vueltas, el eje conserva su dirección en el espacio, sin importar la orientación de la nave espacial.

Una pareja de estudiantes que intentaban estudiar el momento angular decidió hacer una broma pesada a un compañero. Montaron un volante de inercia pesado en un maleta vieja y le aplicaron una rapidez de rotación grande. Después pidieron a su compañero que llevara la maleta a otra sala. Cuando el compañero dio vuelta a una esquina, la parte inferior de la maleta se elevó con rapidez, y casi le arranca el brazo. ¿Qué sucedió? La maleta no siguió al alumno al dar vuelta a la esquina porque el momento angular grande del volante de inercia resistió cualquier cambio en su orientación. No sólo resistió cualquier cambio en su orientación, sino que dio vuelta en una dirección diferente e inesperada.

**Pregunta** Suponga que usted está en el Polo Norte y sostiene un giroscopio que gira rápido y que tiene un vector del momento angular que apunta directo hacia arriba. ¿Hacia dónde apuntará el giroscopio si lo transporta al Polo Sur sin aplicar una torsión sobre él?

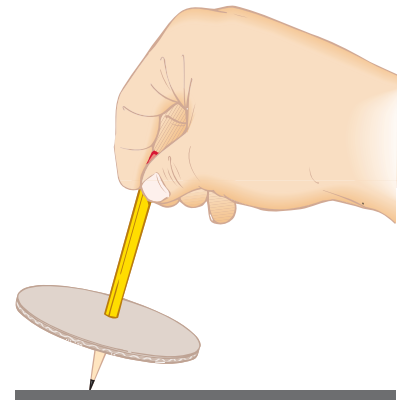
**Respuesta** Apuntará hacia el suelo. Recuerde que esta es la misma dirección (directamente hacia la Estrella Polar) que antes. Usted cambió su propia orientación porque sus pies deben apuntar hacia el centro de la Tierra esférica.

## FÍSICA | HÁGALO USTED MISMO

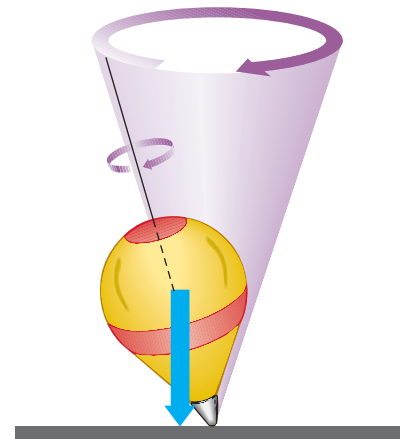
Perfore con un lápiz el centro de un pedazo circular de cartón para que se parezca a la figura 7-17. ¿Puede hacer que el lápiz quede sobre su punta sin sostenerlo? Intente hacerlo girar. ¿Por qué funciona esto? ¿Qué ocurre si intenta esto sin el cartón? Explique sus observaciones.

Un trompo tiene un momento angular, pero no suele ser una constante. Cuando el centro de la masa del trompo no está directamente sobre la punta, la fuerza gravitacional aplica una torsión sobre el trompo. Si el trompo no girara, esta torsión haría que simplemente se volcara. Pero cuando gira, una torsión produce un cambio en la dirección, no en la magnitud, del momento angular. El eje de giro del trompo (y, por lo tanto, su momento angular) trazan un cono, como se observa en la figura 7-18. Decimos que el trompo tiene una *precesión*. La fricción del punto de contacto del trompo con la mesa produce otra torsión. Esta torsión reduce la magnitud del momento angular y termina por hacer que el trompo se frene y se vuelque.

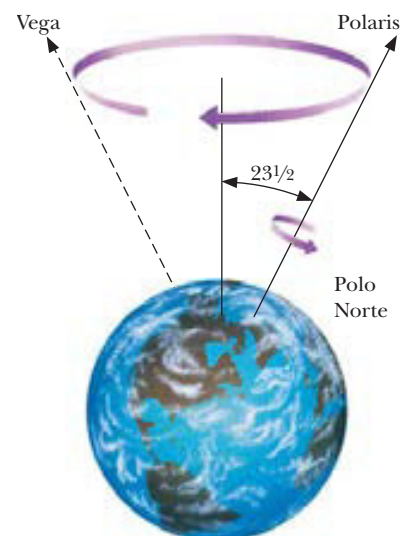
Existe una situación similar con la Tierra. Debido a que la forma de la Tierra es irregular, las fuerzas gravitacionales del Sol y la Luna sobre la Tierra producen torsiones sobre la Tierra que gira. Estas torsiones hacen que el eje de la Tierra tenga una precesión. Esta precesión es muy lenta, pero hace que la dirección de nuestro Polo Norte cubra un enorme cono en el cielo cada 25 780 años (figura 7-19). Por lo tanto, Polaris (la Estrella Polar) no siempre apunta al norte.



**Figura 7-17** ¿Puede hacer que el lápiz quede sobre su punta sin sostenerlo?



**Figura 7-18** Un trompo tiene una precesión debido a la torsión producida por su peso.



**Figura 7-19** La precesión del eje de la Tierra hace que el Polo Norte siga una trayectoria circular entre las estrellas.

## Resumen

Los objetos pueden girar sobre ejes, y esto puede suceder ya sea que su eje esté fijo o se mueva. Los movimientos de rotación y traslación son independientes entre sí. La rotación de un cuerpo libre ocurre respecto a su centro de la masa.

Las reglas para el movimiento de rotación son similares a las reglas para el movimiento de traslación. El desplazamiento es un cambio en la posición angular, la rapidez de rotación es el desplazamiento angular dividido entre el tiempo, y la aceleración de rotación es el cambio en la rapidez de rotación dividida entre el tiempo. La primera y la segunda leyes de Newton para el movimiento de rotación tienen la misma forma que las leyes para el movimiento de traslación. Ocurre un cambio en la rapidez de rotación sólo cuando existe una torsión neta sobre el objeto. La torsión  $\tau$  es igual al radio  $r$  multiplicado por la fuerza perpendicular  $F$ , o  $\tau = rF$ , y sus unidades son newtons-metros. La inercia de rotación depende de la distancia de la masa desde el eje de rotación, al igual que de la masa misma.

La estabilidad de un objeto depende de las torsiones producidas por su peso (que actúa como el centro de la masa) y de las fuerzas que lo apoyan.

Para un objeto que orbita un punto, su momento angular se define como el producto de su momento lineal y el radio de su trayectoria circular,  $L = mvr$ . Para un objeto que gira, el momento angular es el producto de su inercia de rotación y su rapidez de rotación,  $L = I\omega$ .

El momento angular de un sistema se conserva si ninguna torsión externa neta actúa sobre el sistema. Pueden actuar sobre el sistema fuerzas externas, siempre y cuando no produzcan una torsión neta. Aunque se conserva el momento angular, la rapidez de rotación puede cambiar si se modifica la inercia de rotación.

La conservación de una cantidad de vector significa que son constantes su magnitud y su dirección. Asimismo, un cambio en el momento angular puede ser un cambio en la magnitud, la dirección, o ambas. La conservación del momento angular sirve para analizar problemas que van desde el movimiento de los trompos hasta el de los gimnastas y los gatos.

## Capítulo 7



## Revisión

El motor de un helicóptero debe aplicar una torsión sobre el rotor para girar las hélices. A su vez, el rotor aplica una torsión sobre el helicóptero en la dirección opuesta. Si actuara solo, una torsión haría que el helicóptero girara sobre un eje vertical, y adquiriera un momento angular inconveniente. Para evitar esto, el pequeño rotor produce una torsión en la dirección opuesta. En un vuelo recto y nivelado, la torsión neta es cero y, por lo tanto, el momento angular sigue siendo cero. En un helicóptero más grande, los rotores gemelos giran en direcciones opuestas para que el momento angular total del helicóptero sea cero.

## TÉRMINOS IMPORTANTES

**aceleración de rotación:** El cambio en la rapidez de rotación dividido entre el tiempo que tarda en efectuarse el cambio.

**centro de la masa:** El punto de equilibrio de un objeto. Este lugar tiene el mismo movimiento de traslación que tendría el objeto si se encogiera a un punto.

**conservación del momento angular:** Si la torsión externa neta sobre un sistema es cero, no cambia el momento angular total del sistema.

**energía cinética de rotación:** La energía cinética asociada con la rotación de un cuerpo,  $KE = \frac{1}{2}I\omega^2$ .

**equilibrio estable:** Una posición u orientación de equilibrio, en la cual un objeto regresa después de haber sido ligeramente desplazado.

**equilibrio inestable:** Una posición u orientación de equilibrio que un objeto abandona después de haber sido ligeramente desplazado.

**inercia de rotación:** La propiedad de un objeto que mide la resistencia a un cambio en su rapidez de rotación.

**momento angular:** Una cantidad que genera el momento de rotación. Para un objeto que orbita un punto, es el producto del momento lineal y el radio de la trayectoria,  $L = mvr$ . Para un objeto que gira, es el producto de la inercia de rotación y la rapidez de rotación,  $L = I\omega$ .

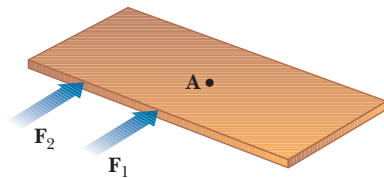
**rapidez de rotación:** El ángulo de rotación o de revolución dividido entre el tiempo transcurrido. Se mide en unidades como grados por segundo o revoluciones por minuto.

**torsión:** El análogo de rotación de la fuerza. Es igual al radio multiplicado por la fuerza perpendicular al radio,  $\tau = rF$ .

**velocidad de rotación:** Una cantidad de vector que incluye la rapidez de rotación y la dirección del eje de rotación.

## PREGUNTAS CONCEPTUALES

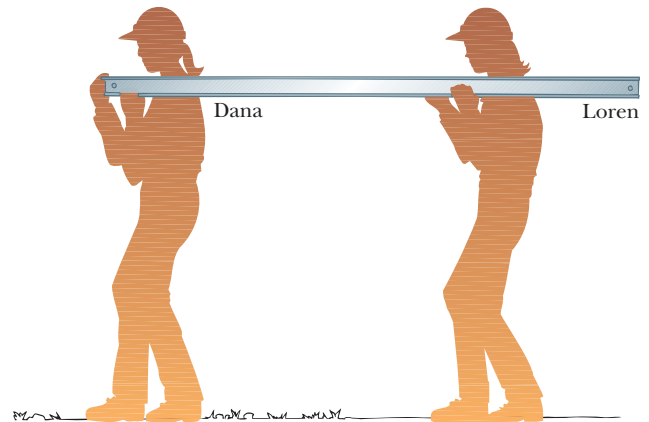
- Una patinadora gira con sus brazos estirados hacia fuera. ¿Qué tiene una rapidez de rotación mayor, sus hombros o la punta de sus dedos? ¿Por qué?
- ¿Quién tiene una rapidez de rotación mayor, una persona que vive en el Ecuador o una que vive en la ciudad de Nueva York?
- Drew y Blake viajan en un carrusel. Drew viaja cerca del centro, mientras que Blake está cerca de la parte exterior. Compare sus aceleraciones de rotación.
- Usted mira hacia abajo en un carrusel y observa que gira en sentido dextrógiro. ¿Cuál es la dirección de la velocidad de rotación del carrusel? Si el carrusel frena, ¿cuál es la dirección de su aceleración de rotación?
- ¿Cuál es la dirección de la velocidad de rotación de la Tierra?
- La rapidez de rotación de la Tierra se frena porque el Sol y la Luna producen mareas. ¿Cuál es la dirección de la aceleración de rotación de la Tierra?
- ¿Cómo llamamos a la resistencia de un objeto a un cambio en su velocidad de rotación?
- ¿Qué se necesita para modificar la velocidad de rotación de un objeto?
- Las estaciones espaciales del futuro girarán para producir una gravedad artificial. ¿Cuál torsión se requiere (si es el caso) para mantener girando las estaciones espaciales?
- Un volante de inercia con una inercia de rotación grande se suele instalar en el eje de dirección de los motores de los automóviles. ¿Para qué sirve el volante de inercia?
- Si el objeto presentado en la figura está fijo, pero libre para girar respecto al punto A, ¿cuál fuerza producirá la torsión más grande? ¿Por qué?



Preguntas 11 y 12

- Si el objeto exhibido en la figura no está fijo y el punto A es el centro de la masa del objeto, ¿cuál fuerza producirá un movimiento de traslación sin rotación?
- Utilice el concepto de la torsión para explicar cómo se usa un martillo de uña para sacar clavos.
- Aplice el concepto de la torsión para explicar cómo una carretilla le permite transportar una carga pesada con una fuerza de levantamiento mucho menor que el peso de la carga.

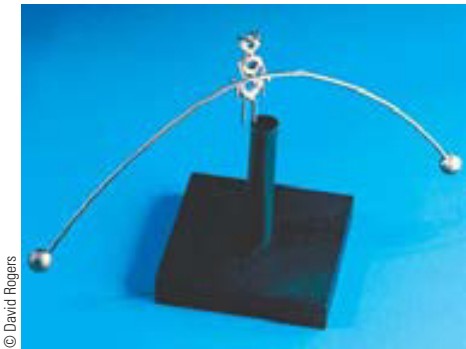
- Usted lava ventanas y, en vez de usar un elevador complicado, decide sólo apoyar una escalera contra una placa de vidrio grande. Utilice el concepto de la torsión para explicar por qué aumenta la probabilidad de romper el vidrio cuanto más alto asciende por la escalera.
- Una bicicleta de 10 velocidades tiene cinco engranes en la rueda trasera. Cuando la bicicleta está en el primer engrane, ¿la cadena está sobre el engrane que tiene el radio más grande o el radio más pequeño? Utilice el concepto de la torsión para ampliar su respuesta.
- Sam y Kelly cargan un escritorio. Sam tiene que ejercer una fuerza mucho mayor que Kelly para mantener nivelado el escritorio. ¿El centro de la masa del escritorio está más cerca de Sam o de Kelly? Incorpore el concepto de la torsión para fijar su respuesta.
- Dana y Loren cargan una viga de acero. Como se observa en la figura, Dana tiene la viga en el extremo, mientras que Loren no. ¿Quién ejerce mayor fuerza sobre la viga? Justifique su respuesta con el concepto de la torsión.



- Dos volantes de inercia tienen la misma masa, pero uno tiene un radio que mide el doble del otro. Si ambos volantes giran sobre sus ejes con la misma rapidez, ¿cuál sería más difícil de detener? ¿Por qué?
- ¿Qué costaría más trabajo hacer girar sobre su eje, un tablero de  $12'' \times 2'' \times 4''$  o uno de  $6'' \times 4'' \times 4''$ ?
- ¿La inercia de rotación de un objeto aumenta o disminuye con un incremento de su masa? ¿Aumenta o disminuye conforme la masa se acerca al eje de rotación?
- ¿Tendría usted una inercia de rotación más grande en las posiciones encogido, carpado o estirado? ¿Por qué? (Consulte la figura 7-14 si no está familiarizado con estas posiciones de clavadistas.)



23. Una esfera densa y un cilindro denso están hechos del mismo material. Si tienen masa y radio iguales, ¿cuál tiene la inercia de rotación menor respecto de su centro? ¿Por qué?
24. Si un disco denso y un aro tienen una masa y un radio iguales, ¿cuál tendría la inercia de rotación menor respecto a su centro de la masa? ¿Por qué?
25. La Tierra gira sobre su propio eje una vez cada 23 horas y 56 minutos. ¿Por qué esta frecuencia ha cambiado muy poco desde la época de Isaac Newton?
26. Encuentre un ejemplo cotidiano que ejemplifique con claridad el significado de la segunda ley de Newton para la rotación.
- ▲ 27. ¿Cómo determinaría el centro de la masa de un automóvil?
28. En el texto encontramos el centro de la masa en la intersección de dos líneas. Si usted cuelga el objeto desde un tercer punto, ¿esta línea pasa por la intersección de las dos primeras? ¿Por qué?
29. ¿Dónde está el centro de la masa de la figurilla apoyada en el pedestal en la fotografía?



© David Rogers

30. Una cuchara y un tenedor cuelgan más allá de la orilla de un vaso mediante un palillo plano, igual que en la figura. ¿Dónde está el centro de la masa de la combinación cuchara-tenedor?



© David Rogers

31. Con diagramas, demuestre por qué un cono de helado es más estable cuando está de cabeza que sobre su punta.
32. La torre inclinada de Pisa es estable aunque tiene una inclinación significativa desde la vertical. Si un constructor

ambicioso decidiera agregar tres pisos más a este monumento histórico, podría perder el equilibrio. Utilice el concepto de equilibrio estable para explicar esto.

33. Una canica está en reposo en un tazón redondo. ¿La canica está en equilibrio estable o inestable? ¿Por qué?



© Benjamin Haas-Shutterstock / Marek Ulasz-Dreamstime

34. El Pacific Science Center en Seattle, Washington, tiene una exhibición en la cual los visitantes pueden montar una bicicleta sobre un riel delgado a bastante distancia sobre el suelo. Un enorme bloque de concreto cuelga bajo la bicicleta sobre una barra larga sujeta con firmeza al cuadro de la bicicleta. ¿Por qué es segura esta exhibición?
35. Si usted está con la espalda contra la pared y trata de inclinarse y tocar la punta de sus pies, invariablemente caerá de bruces. Utilice el concepto de equilibrio para explicar la razón.
36. Si usted está de pie frente a una pared con sus pies tocando la pared, no puede pararse sobre las puntas de sus dedos. Aplique el concepto de equilibrio para explicar esto.
37. Es posible (y muy probable) que el centro de la masa de un saltador de altura pase *bajo* la barra mientras el saltador pasa *sobre* la barra, igual que en la figura. Explique cómo es posible esto.



© Sportgraphic/Dreamstime

38. Un cilindro denso y un aro tienen una masa y un radio iguales. Si ambos giran con la misma rapidez, ¿cuál tendrá la energía cinética de rotación más grande?
39. Suponga que suelta por una rampa el disco denso y el aro de la pregunta 38. Utilice el concepto de energía cinética de rotación para argumentar que el cilindro denso llegará primero a la parte inferior de la rampa.



40. Si le piden que diseñe un volante de inercia de 50 libras para utilizarlo en un automóvil nuevo, ¿concentraría la masa lo más cerca o lo más lejos posible del eje de rotación? Explique su razonamiento.
41. ¿Por qué un helicóptero pequeño tiene un rotor en su cola?
42. ¿Por qué un helicóptero con dos grupos de rotores no necesita un rotor en su cola?



© Margojh/Dreamstime

43. ¿En cuál de las siguientes posiciones tendría un clavadista la inercia de rotación más baja para efectuar un salto mortal de frente: encogido, carpado, o estirado? ¿Por qué? (Consulte la figura 7-14 si no está familiarizado con estas posiciones de clavadistas.)
44. ¿Por qué es posible que un clavadista ejecute más saltos mortales de frente en la posición encogido que en la posición estirado?
45. ¿Por qué las patinadoras giran más rápido cuando encogen sus brazos?



© Steffen Foerster/Dreamstime

46. Un astronauta que “flota” en un transbordador espacial tiene un movimiento de rotación inicial, pero no tiene un movimiento de traslación inicial en relación con el transbordador. ¿Por qué el astronauta sigue girando?



© NASA

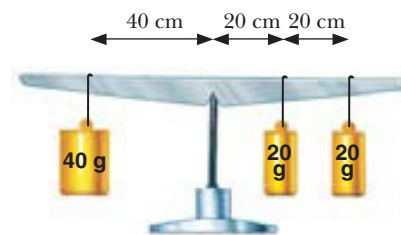
47. Un gato que cae sin un momento angular inicial consigue aterrizar sobre sus patas. ¿El gato necesita adquirir un momento angular para conseguir esto? Explique su razonamiento.
- ▲ 48. Una maniobra inicial sencilla que se aprende en un trampolín es aterrizar sentado con los pies apuntando en una dirección y después invertir eso en el rebote para aterrizar con los pies apuntando en la dirección opuesta. Con la práctica, es posible girar en cualquier dirección a voluntad, después de rebotar. ¿Cómo es posible esto?
- ▲ 49. Si mira el interior del cañón de un rifle, observa largos surcos en espiral. Cuando la bala viaja por el cañón, estos surcos hacen que la bala gire. ¿Para qué sirve que la bala gire?
- ▲ 50. Una bola de billar sin efecto golpea la banda de manera perpendicular y rebota perpendicular a la banda. Sin embargo, si la pelota gira sobre la vertical, rebota hacia un lado y gira un poco más lento. ¿Cuál es la fuerza que provoca el cambio: (a) en el momento lineal de la bola, y (b) en su momento angular?
- ▲ 51. La figura 5-4 presenta un extintor de incendios que sirve para impulsar a una persona en línea recta. Un extintor también sirve para hacer girar un carrusel si una persona se sentara en uno de los caballos y accionara el extintor hacia atrás. Conforme acelera, el carrusel adquiere un momento angular. Utilice el concepto de la torsión para explicar este cambio en el momento angular.
52. Un disco de hockey de aire da vueltas en el extremo de una cuerda que pasa por un pequeño orificio en el centro de la mesa exhibida en la figura. ¿Qué le sucede a la rapidez del disco cuando la cuerda se jala lentamente por el orificio?



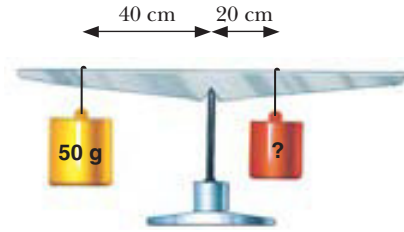
53. Mientras sigue girando, transportan al Polo Sur un giroscopio que apunta horizontalmente al Polo Norte. Al llegar, ¿de qué manera apunta? Explique.
54. Un giroscopio está orientado de modo que apunta hacia la Estrella Polar cuando está en Seattle. Si lo trasladan al Ecuador mientras sigue girando, ¿hacia dónde apuntará y por qué?
55. Algunas personas han propuesto propulsar un automóvil al extraer energía de volantes de inercia rotatorios gigantes instalados en él. Existe un problema con esta sugerencia si sólo se utiliza un volante de inercia. ¿Cuál es el problema y cómo se puede remediar?
56. El equipo de filmación de *Cámara escondida* sustituye el portafolios de una persona con uno idéntico que contiene un volante de inercia que gira. Explique lo que sucede cuando la persona intenta dar vuelta a una esquina con el portafolios.
57. Una maestra está sentada en un banco que gira libremente. Sostiene un volante de inercia cuyo eje está vertical, de modo que la rueda gira en sentido dextrógiro si se mira desde arriba. Ella voltea la rueda por completo y comienza a girar en el banco. ¿Gira en sentido dextrógiro o levógiro? Justifique su respuesta con el concepto de conservación del momento angular.
58. El eje de rotación de la Tierra está inclinado  $23\frac{1}{2}$  grados en relación con el eje de revolución de la Tierra respecto al Sol. El Polo Norte está inclinado hacia el Sol el 22 de junio. ¿Cuál polo está inclinado hacia el Sol el 22 de diciembre?
59. Si se para en el exterior toda la noche y observa las estrellas, todas parecen moverse, excepto una. ¿Cuál estrella parece inmóvil y por qué?
60. ¿Por qué la estrella Polaris no siempre está directamente sobre el Polo Norte geográfico de la Tierra?
61. Usted salta sobre un carrusel que gira en sentido dextrógiro visto desde arriba. Determine la dirección de: (a) el momento angular del carrusel, (b) el cambio en el momento angular del carrusel, (c) el cambio de usted en el momento angular, y (d) el cambio en el momento angular para el sistema formado por usted y el carrusel. Suponga que el carrusel tiene cojinetes muy buenos.
62. Mientras usted camina desde el centro de un carrusel hacia la orilla exterior, el carrusel disminuye su velocidad. ¿Conserva su momento angular? Explique por qué sí o por qué no.
- ▲ 63. Las ruedas de una bicicleta normalmente miden 2 pies de diámetro. Imagine que se construye una bicicleta con ruedas que tienen un diámetro de 4 pulgadas, pero cuyas otras dimensiones son iguales a las de una bicicleta normal. ¿Cómo afectarían estas ruedas más pequeñas la estabilidad de la bicicleta? Justifique su respuesta con el concepto del momento angular.
- ▲ 64. Un vendedor en una distribuidora de motocicletas le comenta de los nuevos neumáticos ultraligeros para motocicletas que han salido al mercado. Los neumáticos tienen el mismo tamaño que los normales, pero su masa es una décima parte de los otros. ¿Cómo afectarían unas ruedas ligeras la estabilidad de la motocicleta? Justifique su respuesta con el concepto de momento angular.

## EJERCICIOS

1. Si las aspas de una mezcladora de alimentos alcanzan 1000 revoluciones en 5 min, ¿cuál es la rapidez de rotación promedio de las aspas? Exprese su respuesta en revoluciones por minuto y revoluciones por segundo.
2. Si un CD efectúa 1500 revoluciones en 5 min, ¿cuál es su rapidez de rotación promedio?
3. ¿Cuál es la rapidez de rotación de la manecilla de un reloj que cuenta los minutos?
4. ¿Cuál es la rapidez de rotación de la manecilla de un reloj que cuenta los segundos?
5. Si un reproductor moderno tarda 3 s en detener un DVD con una rapidez de rotación de 7490 rpm, ¿cuál es la aceleración de rotación promedio del DVD?
6. Un taladro de velocidad variable, que al principio gira a 400 rpm, acelera a 1000 rpm en un tiempo de 0.5 s. ¿Cuál es su aceleración de rotación promedio?
7. ¿Cuál torsión aplica un salmón de 140 N sobre una caña de pescar de 1.5 m de longitud si la caña está horizontal y el salmón está fuera del agua?
8. Usted sostiene una pesa de 5 kg a la distancia de su brazo estirado. Suponiendo que su brazo tiene 0.70 m de longitud, ¿cuál torsión ejerce la pesa sobre su hombro?
9. Un pirata con una masa de 90 kg se para en el extremo de un tablón que se extiende 2 m más allá de la borda. ¿Cuál torsión ejerce el tablón?
10. Robin está de pie atemorizado en la orilla de un trampolín, a gran altura del agua. Si Robin tiene una masa de 65 kg y está parado a 1.5 m del eje del trampolín, ¿cuál torsión ejerce Robin sobre el trampolín?
11. Dos niños con masas de 20 y 30 kg están sentados en un subibaja equilibrado. Si el niño que pesa menos está sentado a 3 m del centro, ¿dónde está sentado el niño que pesa más?
12. Un niño con una masa de 20 kg se sienta a una distancia de 2 m del eje de un subibaja. ¿Dónde debe sentarse un niño de 14 kg para equilibrar el subibaja?
13. ¿Está equilibrado el sistema que se observa en la figura? Si no lo está, ¿cuál extremo caerá? Explique su razonamiento.



14. ¿Cuál masa colgaría en el lado derecho del sistema que se ve en la figura para equilibrarlo? Es decir, para que sean iguales las torsiones dextrógiro y levógiro.



15. Un niño con una masa de 50 kg viaja en un carrusel. Si el niño tiene una rapidez de 3 m/s y está a 2 m del centro del carrusel, ¿cuál es el momento angular del niño?

16. Un automóvil de 1600 kg viaja a 20 m/s sobre una curva que tiene un radio de 120 m. ¿Cuál es el momento angular del vehículo?

- ▲ 17. ¿Cuál tiene el momento angular más grande respecto al Sol: Marte o la Tierra? El radio, la rapidez y la masa de Marte son 1.5, 0.8 y 0.11 veces los de la Tierra, respectivamente.
- ▲ 18. Mercurio sigue una órbita elíptica cuyo punto más cercano al Sol son 46 millones de km y el más lejano son 70 millones de km. En estas dos posiciones, la velocidad de Mercurio forma un ángulo recto con la dirección del Sol. Si la rapidez de Mercurio es 38 km/s cuando está más lejos del Sol, ¿qué tan rápido se mueve cuando está más cerca del Sol?





# 8 Estados de la materia



© Terric Delany/Shutterstock

*Cristales de hielo.*

Muchos materiales existen como sólidos, líquidos o gases cada uno con características propias. Sin embargo, materiales distintos comparten muchas características; por ejemplo, muchos materiales generan formas cristalinas cuando son sólidos. ¿Qué nos dice la forma de un cristal acerca de la estructura fundamental del material?

---

(Consulte la respuesta a esta pregunta en la página 150.)

---



Toda la materia está formada por aproximadamente 100 elementos diferentes. Sin embargo, el mundo material que experimentamos —por ejemplo, en una caminata por el bosque— contiene una variedad aparentemente interminable de formas. Esta variedad surge de las combinaciones particulares de los elementos y de las estructuras que forman, las cuales se dividen en cuatro formas o estados básicos: sólido, líquido, gaseoso y plasma.

Muchos materiales pueden existir en los estados sólido, líquido y gaseoso si las fuerzas que mantienen unidos los elementos químicos son lo bastante fuertes para que sus temperaturas de fusión y vaporización sean más bajas que sus temperaturas de descomposición. Por ejemplo, en el agua, el hidrógeno y el oxígeno están tan estrechamente unidos que el agua existe en los tres estados. Por otra parte, el azúcar se descompone en sus partes constituyentes antes que se pueda convertir en un gas.

Si calentamos un sólido de manera continua, aumenta la energía cinética promedio de sus moléculas y la temperatura del sólido. En algún momento, las uniones moleculares se rompen y las moléculas se deslizan de una a otra (el proceso llamado fusión) para formar un líquido. El siguiente cambio de estado ocurre cuando la sustancia se convierte en un gas. En el estado gaseoso, las moléculas tienen suficiente energía cinética para ser esencialmente independientes entre sí. En un plasma, los átomos individuales se separan violentamente como iones y electrones cargados, y las interacciones eléctricas subsecuentes cambian de manera drástica el comportamiento de la sustancia resultante.

## Átomos

Ya está establecida la evidencia de la existencia de los átomos. Sería natural preguntar, “¿Por qué detenerse ahí?”. Tal vez los átomos no sean el final de nuestra búsqueda de los bloques de construcción fundamentales de la materia. De hecho, no lo son. Los átomos tienen una estructura, y cerca del final de este libro dedicaremos un capítulo a ahondar nuestra comprensión de esta estructura. Por ahora es útil saber un poco acerca de esta estructura para que podamos comprender las propiedades de los estados de la materia.

Un modelo útil de la estructura de un átomo para nuestros propósitos actuales es el modelo de sistema solar desarrollado a principios del siglo XX. En este modelo, se considera que el átomo está formado por un núcleo central diminuto que contiene casi toda la masa del átomo. Este núcleo tiene una carga eléctrica positiva que une al átomo los electrones muy ligeros cargados negativamente, de una manera similar a la atracción gravitacional del Sol sobre los planetas. Las órbitas de los electrones definen el tamaño del átomo y le aportan sus propiedades químicas.

La que une los materiales es la atracción eléctrica entre las partículas atómicas y subatómicas. La fuerza gravitacional es demasiado débil y las fuerzas nucleares tienen un rango muy escaso como para afectar las reacciones químicas. Vivimos en un universo eléctrico en lo que respecta a los estados de la materia. Cómo se forman estos materiales depende de estas fuerzas eléctricas. Y la forma que adoptan determina las propiedades de los materiales.

✓ El suplemento *Problem Solving* (Solución de problemas) ofrece una presentación extendida.

## Densidad

✓ **MATEMÁTICAS**

Una propiedad característica de la materia es su **densidad**. A diferencia de la masa y el volumen, que varían de un objeto a otro, la densidad es una propiedad inherente del material. Una tonelada de cobre y una moneda de cobre tienen masas y volúmenes drásticamente diferentes, pero densidades idénticas. Si usted fuera a descubrir un material desconocido y pudiera asegurarse que fuera puro, podría avanzar mucho en su identificación al medir su densidad.

La densidad se define como la cantidad de masa en una unidad de volumen común y se expresa en unidades de kilogramos por metro cúbico ( $\text{kg/m}^3$ ):

$$\text{densidad} = \frac{\text{masa}}{\text{volumen}} \rightarrow$$

$$D = \frac{M}{V}$$

## Extremos de densidad

¿Qué pesa más: una libra de plumas o una libra de hierro? La respuesta a este acertijo juvenil es que, por supuesto, pesan lo mismo. La diferencia importante entre los dos materiales es la *densidad*; aunque los dos pesan lo mismo, tienen volúmenes muy diferentes. La densidad es la comparación de las masas de las dos sustancias con los mismos volúmenes. Es obvio que 1 metro cúbico de hierro tiene mucha más masa que 1 metro cúbico de plumas.

Las densidades de los objetos cubren un intervalo muy grande. Las densidades de los materiales comunes en la Tierra palidecen en comparación con las de los objetos astronómicos. Después que a una estrella se le agota el combustible, su propia atracción gravitacional provoca que se colapse. El colapso se detiene cuando las fuerzas externas debido a la presión en la estrella equilibran las fuerzas gravitacionales. Los núcleos estelares resultantes pueden tener densidades astronómicamente grandes. Pueden tener masas hasta de 1.4 veces las de nuestro Sol comprimidas a un tamaño cercano al de la Tierra, lo cual produce densidades un millón de veces más grandes que las del agua. Las estrellas de neutrones

son núcleos que quedan después que explota una estrella y pueden tener densidades mil millones de veces más grandes que las enanas blancas. Una cucharada de material de una estrella de neutrones puede pesar mil millones de toneladas en la Tierra.

En el Lawrence Livermore National Laboratory en California, crearon un sólido con una densidad muy baja, llamado *aerogel de sílice*. Este sólido está hecho de dióxido de silicio y tiene una densidad de sólo tres veces la del aire. Debido a esta densidad muy baja, también se conoce como “humo sólido”. Debido a que el aerogel de sílice es un sólido, conserva su forma. De hecho, soporta 1600 veces su propio peso.

La densidad del espacio interestelar es mucho menor que la del aire; existe aproximadamente un átomo por centímetro cúbico, lo cual produce una densidad de cerca de una milmillonésima de billonésima de la del aire a una atmósfera de presión, o de alrededor de una billonésima de billonésima de ( $10^{-24}$ ) de la del agua.

Por ejemplo, una barra de aluminio tiene 3 metros de longitud, 1 metro de ancho y 0.3 metro de grosor. Si tiene una masa de 2430 kilogramos, ¿cuál es la densidad del aluminio? Primero calculamos el volumen y después la densidad:

$$V = lag = (3 \text{ m})(0.3 \text{ m}) = 0.9 \text{ m}^3$$

$$D = \frac{M}{V} = \frac{2430 \text{ kg}}{0.9 \text{ m}^3} = 2700 \text{ kg/m}^3$$

Por tanto, la densidad del aluminio son 2700 kilogramos por metro cúbico. Las densidades también se suelen expresar en gramos por centímetro cúbico. De ese modo, la densidad del aluminio también son 2.7 gramos por centímetro cúbico ( $\text{g/cm}^3$ ). La tabla 8-1 presenta las densidades de varios materiales comunes.

**Pregunta** ¿Qué tiene mayor densidad, 1 kilogramo de hierro o 2 kilogramos de hierro?

**Respuesta** Tienen la misma densidad; la densidad de un material no depende de la cantidad del material.

Las densidades de los materiales van desde baja para un gas bajo condiciones normales, a alta para el elemento osmio. Un metro cúbico de osmio tiene una masa de 22 480 kilogramos (un peso de casi 50 000 libras), aproximadamente 22 veces más grande que el mismo volumen de agua. Es interesante observar que el átomo de osmio concentra menos masa que un átomo de oro. Por lo tanto, la mayor densidad del osmio indica que los átomos de osmio deben estar muy cerca unos de otros.

Los materiales que encontramos normalmente tienen densidades cercanas a la del agua, 1 gramo por centímetro cúbico. Un centímetro cúbico es aproximada-

**Tabla 8-1**

### Densidades de algunos materiales comunes

Material	Densidad ( $\text{g/cm}^3$ )
Aire*	0.0013
Hielo	0.92
Agua	1.00
Magnesio	1.75
Aluminio	2.70
Hierro	7.86
Cobre	8.93
Plata	10.5
Plomo	11.3
Mercurio	13.6
Uranio	18.7
Oro	19.3
Osmio	22.5

\*A 0°C y 1 atm.

mente el volumen de un cubo de azúcar. Las densidades de los materiales de la superficie de la Tierra promedian aproximadamente 2.5 gramos por centímetro cúbico. La densidad del núcleo de la Tierra es de cerca de 9 gramos por centímetro cúbico, lo cual hace la densidad promedio de la Tierra de unos 5.5 gramos por centímetro cúbico.

**Pregunta** Si una esfera hueca y una esfera densa están hechas de la misma cantidad de hierro, ¿cuál esfera tiene la densidad promedio más alta?

**Respuesta** La esfera densa tiene una densidad promedio más alta porque ocupa el volumen más reducido para una masa específica de hierro.

### FÍSICA | HÁGALO USTED MISMO

Determine su densidad. Puede obtener una medida bastante exacta de su volumen al sumergirse en una tina de baño. Multiplique el área de la tina por la diferencia en los niveles de agua cuando usted está dentro y fuera de la tina. Su masa también se determina a partir de su peso. (En la Tierra, 1 kilogramo tiene un peso de 2.2 libras.)



### SOLUCIÓN | Densidad

Suponga que encuentra un pedazo de material que no puede identificar. Establece que el pedazo tiene una masa de 87.5 g y un volumen de 50 cm<sup>3</sup>. ¿Cuál es el material, y cuál es la masa de un trozo de 6 cm<sup>3</sup> de este material?

Podemos fácilmente determinar la masa de 6 cm<sup>3</sup>, si sólo conocemos la masa de 1 cm<sup>3</sup>. Esto es justo la densidad. Podemos conocer la densidad a partir de las mediciones hechas sobre el pedazo original:

$$D = \frac{M}{V} = \frac{87.5 \text{ g}}{50 \text{ cm}^3} = 1.75 \text{ g/cm}^3$$

Esta densidad es la misma que la del magnesio. Por lo tanto, el material puede ser magnesio pero, para confirmarlo, necesitaríamos analizar otras características.

El trozo de 6 cm<sup>3</sup> tiene una masa seis veces más grande que la masa de 1 cm<sup>3</sup>:

$$M = DV = (1.75 \text{ g/cm}^3)(6 \text{ cm}^3) = 10.5 \text{ g}$$

## Sólidos

Los **sólidos** tienen la variedad más grande de propiedades de los cuatro estados de la materia. Sus elementos constituyentes y su estructura particular determinan el carácter de una sustancia sólida. Esta estructura fundamental depende de la manera en que se formó. Por ejemplo, un enfriamiento lento suele conducir a la solidificación con los átomos en un estado ordenado, conocido como un **cristal**.

### FÍSICA | HÁGALO USTED MISMO

El salol, un compuesto utilizado por los farmacéuticos en las medicinas, es interesante porque su punto de fusión está sólo un poco arriba de la temperatura ambiente. Funda una pizca de salol en un pequeño cuenco de vidrio que flote sobre agua caliente. En cuanto se funda, quite el cuenco del agua caliente y observe que el líquido se solidifica.

Los cristales crecen en diversas formas. Su propiedad común es el orden de su distribución atómica. El orden consiste en una distribución básica de los elementos que se repite por el cristal, similar a los esquemas geométricos que se repiten en algunos papeles pintados.

El orden microscópico de los átomos no es siempre obvio en las muestras macroscópicas. Por alguna razón, hay muy pocos cristales perfectos; casi todas las muestras son agregados de cristales pequeños. Sin embargo, existe una evidencia macroscópica de esta estructura fundamental. Un ejemplo común en los climas del norte es un copo de nieve (figura 8-1). Su simetría séxtuple es una evidencia de la estructura de hielo. Otro ejemplo es la mica (figura 8-2), un mineral que puede encontrar en un paseo por los bosques. Se pueden observar escamas brillantes de mica en muchas rocas. Los pedazos más grandes se separan con facilidad en hojas delgadas. La delicadeza de las hojas parece (cuando menos en una escala macroscópica) ilimitada. Es fácil comprobar que los átomos en la mica están ordenados en hojas bidimensionales con uniones relativamente fuertes entre los átomos dentro de la hoja y uniones mucho más débiles entre las hojas.

En contraste con la mica, la sal de mesa común exhibe una estructura tridimensional de átomos de sodio y cloro. Si usted disuelve la sal en agua y deja que el agua se evapore lentamente, los cristales de sal que se forman tienen estructuras cúbicas muy obvias. Si intenta cortar con una navaja un pedazo pequeño de sal, encuentra que no se separan en hojas como la mica, sino que se fractura a lo largo de planos paralelos a sus caras. (La sal de un salero exhibe esta misma estructura, pero los granos suelen ser mucho más pequeños. Una simple lupa le permite ver la estructura cúbica.) Las piedras preciosas también tienen planos en su estructura cristalina. Un cortador de joyas estudia las gemas en bruto con mucha atención antes de hacer las escisiones que producen una buena pieza de joyería.

## FÍSICA | HÁGALO USTED MISMO

Examine cristales de sal y de azúcar con una lupa. Si espolvorea cristales de sal o azúcar sobre una hoja de papel en blanco y los separa con cuidado, observará estructuras inconfundibles que aportan pistas del orden atómico fundamental.

Algunas sustancias tienen más de una estructura cristalina. Un ejemplo común es el carbono puro. El carbono puede formar cristales de diamante o de grafito (figura 8-3). El diamante es una sustancia muy dura muy apreciada por su brillo óptico. El diamante tiene una estructura tridimensional. Por otra parte, el grafito tiene una estructura bidimensional como la mica, la cual crea hojas del material que son relativamente fáciles de mover una sobre otra. Debido a su naturaleza resbaladiza, el grafito se usa como lubricante y es el “plomo” de los lápices.

## Líquidos

Cuando un sólido se funde, se rompen los enlaces interatómicos, lo cual permite que los átomos o las moléculas se deslicen unos sobre otros, y produzcan un líquido. Los **líquidos** tienen la forma del recipiente que los contiene, de manera muy similar al apilamiento aleatorio de un montón de canicas.

La temperatura a la que se funde un sólido varía de un material a otro, sencillamente porque son diferentes las fuerzas de enlace. El hidrógeno tiene enlaces tan movedizos que se vuelve un líquido a 14 K. El oxígeno y el nitrógeno —que constituyen el aire que respiramos— se funden a 55 K y 63 K, respectivamente. El hecho de que el hielo no se funde hasta los 273 K (0°C) nos dice que los enlaces entre las moléculas son relativamente fuertes.

El agua es un líquido singular. Aunque abunda, es uno de sólo unos cuantos líquidos que ocurren a temperaturas comunes en la Tierra. Los enlaces entre las moléculas de agua son relativamente fuertes, y se requiere una alta temperatura para separarlos hacia un estado gaseoso.



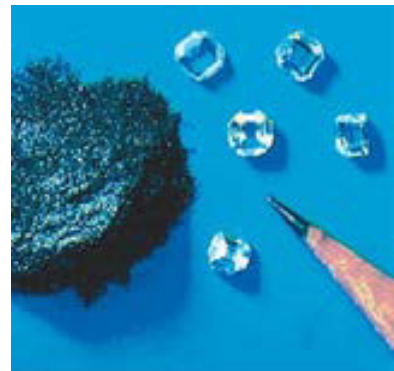
© Yaroslav/Shutterstock

**Figura 8-1** Las simetrías séxtuples que exhiben los copos de nieve es una evidencia de que los cristales de hielo tienen formas hexagonales.



© Charles D. Winters

**Figura 8-2** Las muestras de mica exhiben una estructura cristalina bidimensional, como lo evidencia el hecho de que es posible pelar capas delgadas del cristal más grande.



Cortesía de © Leonard Fine

**Figura 8-3** Los diamantes sintéticos y el grafito finamente dividido son dos formas cristalinas distintas del carbono.





© George Sample

**Figura 8-4** Un vaso lleno con leche más allá del borde evidencia la tensión superficial.



© George Sample

**Figura 8-5** Una aguja de acero flota sobre el agua a causa de la tensión superficial del agua.



© Donna Martínez/Dreamstime

**Figura 8-6** La tensión superficial minimiza el área superficial de la película de jabón que forma estas burbujas.

Las fuerzas intermoleculares en un líquido crean una “piel” especial sobre la superficie del líquido. Esto se observa en la figura 8-4, en la cual se ha llenado un vaso con leche más allá de su borde. ¿Qué evita que más líquido fluya sobre el borde?

Imagine dos moléculas, una sobre la superficie de un líquido y una a mayor profundidad dentro del líquido. La molécula bajo la superficie experimenta fuerzas de atracción en todas las direcciones de parte de sus vecinas. La molécula en la superficie sólo siente las fuerzas por debajo y a los lados. Este desequilibrio tiende a atraer las moléculas superficiales de vuelta hacia el líquido.

### FÍSICA | HÁGALO USTED MISMO

Una aguja seca con una densidad mucho mayor que la del agua en realidad flota sobre la superficie del agua, como se aprecia en la figura 8-5. Utilice una pinzas para colocar lentamente la aguja sobre la superficie.

La tensión superficial también intenta atraer los líquidos hacia formas con las áreas superficiales más pequeñas posible. La tensión superficial que intenta minimizar el área inicial de la película determina las formas de las burbujas de jabón (figura 8-6). Si no hay fuerzas externas, el líquido forma gotas esféricas. De hecho, permitir que los líquidos se enfríen en el espacio se ha propuesto como un modo para hacer esferas casi perfectas. En el ambiente de caída libre de un transbordador espacial que orbita, las gotas de los líquidos son casi esféricas.

Las tensiones superficiales varían entre los líquidos. El agua, como cabría esperar, tiene una tensión superficial relativamente alta. Si agregamos jabón o aceite al agua, se reduce la tensión superficial, lo que significa que las moléculas de agua no se atraen entre sí. Es probable que sea razonable deducir que las nuevas moléculas en la solución, de alguna manera, resguardan las moléculas de agua una de otra.

## Gases

Cuando las moléculas se separan por completo, un líquido se convierte en un **gas**. El gas ocupa un volumen de alrededor de 1000 veces más grande que el del líquido. En el estado gaseoso, las moléculas tienen suficiente energía cinética para, en esencia, ser independientes entre sí. Un gas llena el recipiente que lo contiene, y adopta su forma y volumen. Debido a que los gases son principalmente espacio vacío, se pueden comprimir y mezclar fácilmente con otros.

Los gases y los líquidos tienen algunas propiedades comunes porque ambos son “fluidos”. Todos los fluidos son capaces de fluir, algunos con mayor facilidad que otros. La **viscosidad** de un fluido es una medida de su fricción interna. Obtiene una sensación cualitativa de la viscosidad de un fluido al verterlo. Los fluidos que se vierten fácilmente, como el agua y la gasolina, tienen viscosidades bajas. Los que se vierten con lentitud, como la melaza, la miel y la clara de huevo, tienen viscosidades altas. El vidrio es un fluido con una viscosidad sumamente alta. En el invierno, los conductores ponen en sus automóviles aceite de viscosidad más baja para que fluya mejor en las mañanas frías.

La viscosidad de un fluido determina su resistencia ante los objetos que se mueven a través de él. El descenso seguro de un paracaidista se debe a la viscosidad del aire. El aire y el agua tienen viscosidades drásticamente diferentes. Imagine que participa en una carrera de 100 metros en agua con un metro de profundidad.

**Pregunta** ¿Cómo explica la observación de que las viscosidades de los fluidos disminuyen conforme se calientan?

**Respuesta** La mayor energía cinética de las moléculas significa que son más independientes entre sí.



## Plasmas

A aproximadamente  $4500^{\circ}\text{C}$ , se funden todos los sólidos. A  $6000^{\circ}\text{C}$  todos los líquidos se han convertido en gases. Y en algún punto superior a los  $100\,000^{\circ}\text{C}$ , casi toda la materia se ioniza hacia un estado de **plasma**. En la transición entre un gas y un plasma, los átomos mismos se convierten en partículas con carga eléctrica.

Aunque es más raro en la Tierra que los estados sólido, líquido y gaseoso, el cuarto estado de la materia, el plasma, en realidad es el estado de la materia más común en el universo (más de 99%). Entre los ejemplos de plasma que ocurren en la naturaleza en la Tierra están las luces fluorescentes y las señales de neón. Las luces fluorescentes consisten en un plasma creado mediante un voltaje alto que despoja al vapor de mercurio de algunos de sus electrones. Las señales de “neón” emplean el mismo mecanismo, pero utilizan diversos gases para crear los diferentes colores.

Tal vez el efecto de plasma más hermoso que ocurre en la naturaleza es la aurora boreal. La atmósfera superior de la Tierra atrapa las partículas cargadas emitidas por el Sol y otras estrellas, para formar un plasma conocido como cinturones de radiación de Van Allen. Estas partículas de plasma interactúan con los átomos de nitrógeno y oxígeno sobre los polos magnéticos y hace que emitan luz.

Los plasmas son importantes en la energía nuclear, al igual que en los interiores de las estrellas. Una fuente de energía potencial importante para el futuro es la “quema” de un plasma de iones de hidrógeno a una temperatura muy alta, para crear energía nuclear.

## Presión

### ✓ MATEMÁTICAS

Una propiedad macroscópica de un fluido —ya sea un gas o un líquido— es su cambio en la presión con la profundidad. La presión es la fuerza por unidad de área que se ejerce sobre una superficie, y se mide en unidades de newtons por metro cuadrado ( $\text{N}/\text{m}^2$ ), una unidad conocida como pascal (Pa).

Cuando un gas o un líquido está bajo la influencia de la gravedad, el peso del material que está encima de cierto punto ejerce una fuerza hacia abajo, y crea una presión en ese punto. Por lo tanto, la presión en un fluido varía con la profundidad. Es probable que haya sentido esto al nadar. Conforme se dirige a lo profundo, aumenta la presión sobre sus tímpanos. Si nada en forma horizontal a esta profundidad, observará que la presión no cambia. De hecho, no hay un cambio si usted gira la cabeza; la presión en una profundidad específica en un fluido es igual en todas las direcciones.

Considere la caja de fluido presentada en la figura 8-7. Debido a que el fluido de la caja no se mueve, la fuerza neta sobre el fluido debe ser cero. Por lo tanto, el fluido bajo la caja debe ejercer una fuerza hacia arriba sobre la parte superior de la caja igual al peso del fluido en la caja más la fuerza de la atmósfera sobre la parte superior de la caja. La presión en la parte inferior de la caja es sólo esta fuerza por unidad de área.

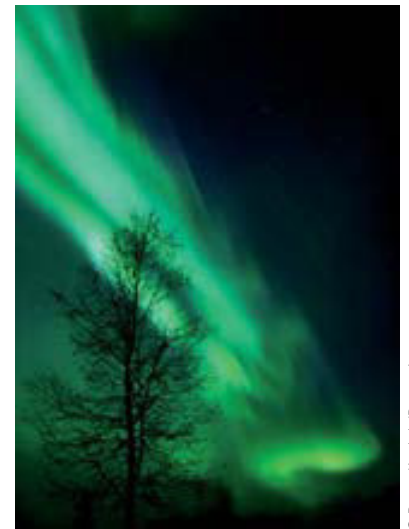
Nuestra atmósfera se mantiene en un recipiente bastante extraño, la superficie bidimensional de la Tierra. La gravedad mantiene abajo la atmósfera para que no escape. No existe una parte superior definida para nuestra atmósfera; sólo se vuelve más delgada conforme se extiende desde la superficie terrestre.

La presión del aire en la superficie terrestre se debe al peso de la columna de aire encima de la superficie. A nivel del mar, la presión atmosférica promedio es de cerca de 101 kilopascales. Esto significa que una columna de aire que tiene un metro cuadrado en un corte transversal y llega a la parte superior de la atmósfera pesa 101 000 newtons y tiene una masa de 10 toneladas métricas. Una columna similar de aire de 1 pulgada cuadrada en su corte transversal pesa 14.7 libras; por lo tanto, la presión atmosférica también son 14.7 libras por pulgada cuadrada.

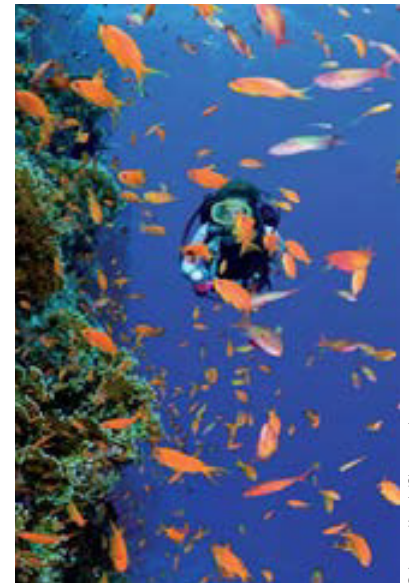
Podemos utilizar estas ideas para describir lo que le ocurre a la presión atmosférica conforme ascendemos. Puede pensar que la presión disminuye a un medio del valor de la superficie a medio camino hacia la “parte superior” de la atmósfera. Sin embargo, esto no es cierto, porque el aire cerca de la superficie terrestre es mucho



La miel es un fluido muy viscoso.



La aurora boreal es el resultado de la interacción de las partículas cargadas con las moléculas del aire.



La presión sobre un buzo aumenta con la profundidad.



**Figura 8-7** La fuerza de la parte inferior de la caja de fluido es igual al peso del fluido en la caja más la fuerza de la atmósfera en la parte superior de la caja.



**Figura 8-9** En un barómetro de mercurio, la presión atmosférica se equilibra con la presión debida al peso de la columna de mercurio.

más denso que el que está cerca de la parte superior de la atmósfera. Esto significa que hay mucho menos aire en la mitad superior, comparada con la mitad inferior. Debido a que la presión a una altitud específica depende del peso del aire encima de esa altitud, la presión cambia con más rapidez cerca de la superficie. De hecho, la presión disminuye a la mitad cerca de los 5500 metros (18 000 pies) y luego vuelve a disminuir a la mitad en los siguientes 5500 metros. Esto significa que los aviones comerciales que vuelan a una altitud normal de 36 000 pies experimentan presiones de sólo una cuarta parte de las de la superficie.

Igual que los peces que viven en el suelo oceánico, quienes estamos acostumbrados a la superficie por lo general no estamos conscientes de esta presión debido a la inmensidad de aire encima de nosotros. Aunque la presión atmosférica a nivel del mar puede no parecer mucha, considere la fuerza total sobre la superficie de su cuerpo. Un cuerpo humano normal tiene aproximadamente 2 metros cuadrados (3000 pulgadas cuadradas) de área superficial. Esto significa que la fuerza total sobre el cuerpo es de cerca de 200 000 newtons (20 toneladas).

---

**Pregunta** ¿Por qué la fuerza muy grande sobre la superficie de su cuerpo no lo aplasta?

---

**Respuesta** No lo aplasta porque la presión del interior de su cuerpo es igual que la exterior. Por lo tanto, la fuerza hacia dentro se equilibra con una fuerza hacia afuera.

---

Un experimento ingenioso efectuado por un contemporáneo de Isaac Newton demostró que se pueden producir fuerzas grandes mediante la presión atmosférica. El científico alemán Otto von Guericke unió dos medias esferas (figura 8-8) con un simple empaque (sin abrazaderas ni pernos). Después se extrajo el aire de la esfera, para crear un vacío parcial. Dos equipos de ocho caballos no pudieron separar los hemisferios.

En los informes del clima, se suele mencionar la presión atmosférica en unidades de milímetros o pulgadas de mercurio. Una presión normal son 760 milímetros (30 pulgadas) de mercurio. Debido a que la presión es una fuerza por unidad de área, debe parecer extraño informar la presión en unidades de longitud. Esta escala proviene del método histórico de medir la presión. Los primeros medidores de presión eran similares al barómetro de mercurio sencillo de la figura 8-9. Un tubo de vidrio sellado se llena con mercurio y se invierte sobre un cuenco con mercurio. Después de la inversión, la columna con mercurio no se vierte hacia el cuenco, sino conserva una altura definida sobre la fuente de mercurio. Debido a que el mercurio no fluye, sabemos que la fuerza debida a la presión atmosférica en la parte inferior de la columna es igual al peso de la columna con mercurio. Esto significa que la presión atmosférica es la misma que la presión en la parte inferior de una columna con mercurio de 760 milímetros de altura, si existiera un vacío sobre el mercurio. Por lo tanto, la presión atmosférica se puede caracterizar por la altura de la columna de mercurio que soportará.

La presión atmosférica también le permite beber con un popote. Mientras absorbe por el popote, reduce la presión arriba del líquido en el popote, lo que permite que la presión que hay abajo impulse el líquido hacia arriba. De hecho, si pudiera absorber con la fuerza suficiente para producir un vacío perfecto sobre el agua, podría usar un popote de 10 metros (casi 34 pies) de longitud. De modo que aunque a menudo hablamos de absorber el refresco por el popote y hacemos subir la bebida, en realidad quitamos la presión de aire de la parte superior del popote y la presión atmosférica impulsa la soda hacia arriba.



**Figura 8-8** Dos equipos de ocho caballos no pudieron separar las medias esferas vaciadas de Von Guericke.

## Líquidos sólidos y sólidos líquidos

Existen muchas sustancias entre los límites normales de los sólidos y los líquidos. Cuando se enfrían los materiales como el vidrio o la cera, las moléculas se congelan en el espacio sin organizarse en una estructura cristalina ordenada. Estos sólidos son amorfos, lo que significa que conservan algunas de las propiedades de los líquidos. Un ejemplo común de un sólido amorfo es la paleta de dulce transparente que se hace al enfriar rápidamente el azúcar líquida. Las fuerzas intermoleculares promedio en un material amorfo son más débiles que las de una estructura cristalina.

A pesar de la rigidez sólida de un material amorfo, esta forma se parece más a un líquido que a un sólido por su falta de orden. Además, los puntos de fusión de los materiales amorfos no se definen con claridad. Un material amorfo simplemente se vuelve cada vez más suave, hasta pasar al estado fluido. Otra característica de estos líquidos sólidos es que en realidad fluyen como un líquido, aunque muchos fluyen en escalas de tiempo que dificultan o imposibilitan su detección. Mientras que muchos creen que las ventanas de las iglesias

antiguas en Europa son más gruesas en la parte inferior que en la superior debido a siglos de flujo, lo más probable es que se hayan preparado con los bordes más gruesos abajo.

Otras sustancias son líquidos que conservan cierto nivel de orden, característico de los sólidos. Los cristales líquidos se pueden verter igual que los líquidos comunes. Carecen de un orden de posición, pero poseen un orden de orientación. Los voltajes eléctricos reducidos pueden alinear las moléculas semejantes a barras sobre una dirección específica.

Los cristales líquidos tienen ciertas aplicaciones interesantes, porque las luces polarizadas se comportan de manera distinta, dependiendo de si viajan paralelas o perpendiculares a la dirección de alineamiento. Por ejemplo, la orientación se puede manipular en forma eléctrica para producir los números en un reloj digital o en una calculadora electrónica. Puede verificar que la luz que emerge de una pantalla de cristales líquidos está polarizada al observar la pantalla con anteojos polarizados. Un cambio en la orientación de los anteojos modificará la intensidad de la imagen.



© Patryk Kosmider/Dreamstime

La pantalla de este televisor LCD es una aplicación de la tecnología de cristales líquidos.

---

**Pregunta** ¿Qué tan largo puede ser un popote que sirva para absorber refresco?

---

**Respuesta** Debido a que el refresco es principalmente agua, suponemos que tiene la misma densidad del agua. Por lo tanto, el popote puede tener 10 metros de altura, pero sólo si usted tiene pulmones muy fuertes. Es más probable que un altura normal sea 5 metros.

---

Conforme usted se sumerge más en el agua, aumenta la presión por las mismas razones que en el aire. Debido a que la presión atmosférica puede soportar una columna de agua de 10 metros de altura, tenemos un modo de igualar las dos



Los exploradores submarinos deben utilizar recipientes como éste en las grandes profundidades del suelo oceánico.

© Mike Heywood/Shutterstock



presiones. La presión en el agua debe aumentar por el equivalente de 1 atmósfera (atm) por cada 10 metros de profundidad. Por lo tanto, a una profundidad de 10 metros, esperaría una presión de 2 atmósferas, 1 del aire y 1 del agua. Las presiones son tan fuertes a grandes profundidades que deben utilizarse embarcaciones muy fuertes para evitar que los ocupantes sean aplastados.

**Pregunta** ¿Cuál es la presión sobre un buzo a una profundidad de 30 metros (100 pies).

**Respuesta** La presión sería  $(30 \text{ metros}) / (10 \text{ metros por atmósfera}) = 3 \text{ atmósferas}$  debido al agua, más 1 atmósfera debido al aire sobre el agua, para un total de 4 atmósferas.

### Razonamiento defectuoso



Jeff diseña un nuevo equipo de buceo que es tan sencillo que le sorprende que nadie haya pensado en eso antes. Sujeta una manguera de jardín a un bloque grande de espuma de poliestireno para mantener la manguera sobre el nivel del agua. Respirará por el otro extremo de la manguera mientras explora las profundidades. ¿Qué tiene de incorrecto el diseño sencillo de Jeff?

**Respuesta** Si Jeff bucea a 10 metros bajo la superficie, el agua presionará hacia adentro sobre él con 2 atmósferas de presión. Por lo tanto, el aire en sus pulmones estará a una presión de 2 atmósferas. Debido a que el aire en la manguera estará a una presión de 1 atmósfera, expulsará el aire de sus pulmones y no podrá respirar.



**Figura 8-10** La fuerza de flotación sobre el cubo se debe a la presión más alta sobre la superficie inferior.

### Hundimiento y flotación



Es tan común flotar para quienes nadan que tal vez no se les haya ocurrido preguntar “¿Por qué las cosas se hunden o flotan? ¿Por qué se hunde una pelota de golf y flota un trasatlántico? ¿En qué se parece un globo de aire caliente a un trasatlántico?”.

Todo lo que flota debe tener una fuerza hacia arriba que contrarreste la fuerza de gravedad, porque sabemos por la primera ley del movimiento de Newton (capítulo 3) que las fuerzas desequilibrantes no actúan sobre un objeto en reposo. Por lo tanto, para comprender por qué flotan las cosas es necesario encontrar la fuerza de flotación hacia arriba opuesta a la fuerza de gravedad.

La fuerza de flotación existe porque la presión en el fluido varía con la profundidad. Para comprender esto, considere el metro cúbico de un fluido de la figura 8-10. La presión sobre la superficie inferior es mayor que sobre la superficie superior, lo cual produce una fuerza neta hacia arriba. La fuerza hacia abajo sobre la superficie superior se debe al peso del fluido sobre el cubo. La fuerza hacia arriba sobre la superficie inferior es igual al peso de la columna de fluido encima de la parte

inferior del cubo. La diferencia entre estas dos fuerzas es sólo el peso del fluido en el cubo. Por lo tanto, la fuerza neta hacia arriba debe ser igual al peso del fluido en el cubo.

Estas presiones no cambian si un cubo de algún otro material sustituye el cubo del fluido. Por lo tanto, la fuerza neta hacia arriba todavía es igual al peso del fluido que se reemplazó. Este resultado se conoce como **principio de Arquímedes**, en honor del científico griego que lo descubrió.

La fuerza de flotación es igual al peso del fluido desplazado.

◀ principio de Arquímedes

Cuando usted pone un objeto en un fluido, desplaza cada vez más fluido conforme se hunde en el líquido y, por lo tanto, la fuerza de flotación aumenta. Si la fuerza de flotación es igual al peso del objeto antes que se sumerja por completo, el objeto flota. Esto ocurre cada que la densidad de un objeto es menor que la del fluido.

Podemos convertir un plomo en un flotador al aumentar la cantidad de fluido que desplaza. Es evidente que un pedazo denso de acero con el mismo peso de un trasatlántico se hunde en el agua. Podemos hacer que el acero flote al moldearlo de nuevo como una caja hueca. No quitamos nada de material; sólo modificamos su volumen. Si hacemos el volumen suficientemente grande, desplazará agua suficiente para flotar.

El hielo flota debido a una fuerza de flotación. Cuando el agua se congela, los átomos se organizan de una manera que ocupa más volumen. Como resultado, el hielo tiene una densidad más baja que el agua líquida y flota en la superficie. Esto es afortunado; de lo contrario, el hielo se hundiría hacia el fondo de los lagos y ríos, y congelaría los peces y las plantas.

### FÍSICA | HÁGALO USTED MISMO

La siguiente ocasión que vaya a nadar o utilice una tina de baño, calcule su densidad al observar cuánto de su cuerpo flota encima de la superficie del agua.

La fuerza de flotación está presente incluso cuando el objeto se hunde. Por ejemplo, cualquier objeto pesa menos en el agua que en el aire. Puede verificar esto al colgar un objeto pequeño mediante una banda de goma. Cuando pone el objeto sobre un vaso de agua, la banda de goma se estira menos, porque la fuerza de flotación ayuda a sostener el objeto.

**Pregunta** Un pedazo de hierro con una masa de 790 gramos desplaza 100 gramos de agua cuando se hunde. ¿Cuánto pesa el hierro en el aire y bajo el agua?

**Respuesta** En el aire su peso se obtiene mediante  $mg = (0.79 \text{ kg}) \times (10 \text{ [metros por segundo]} \text{ por segundo}) = 7.9 \text{ newtons}$ . En el agua, esto se reduce a causa del peso del agua desplazada. Por lo tanto, tenemos  $7.9 \text{ newtons} - 1 \text{ newton} = 6.9 \text{ newtons}$ .



© Michael Ludwig/Dreamstime

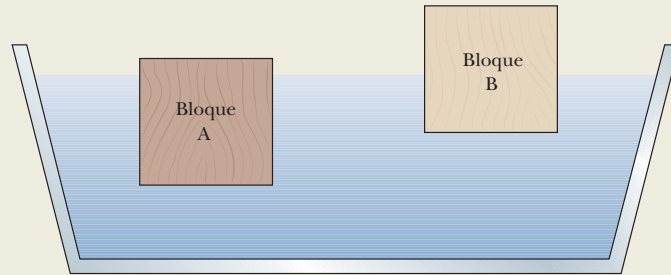
Un cambio en la forma del acero lo convierte en un flotador. Un pedazo denso de acero con la masa del trasatlántico se hunde.



## Razonamiento defectuoso



Dos bloques de madera del mismo tamaño y con la misma forma flotan en un cubo de agua. El bloque A flota más abajo en el agua, y el bloque B flota alto, como se observa en la figura:



Tres estudiantes acaban de salir de una interesante conferencia sobre el principio de Arquímedes y analizan las fuerzas de flotación sobre los bloques.

**Erin:** “El bloque B flota más alto en el agua. Una fuerza de flotación más grande actúa sobre él.”

**Diego:** “Olvidan la primera ley de Newton. Ninguno de los bloques se mueve, de modo que la fuerza de flotación debe equilibrar la fuerza gravitacional en ambos casos. Las fuerzas de flotación deben ser iguales para cada uno.”

**Ashley:** “Arquímedes nos enseñó que la fuerza de flotación *siempre* es igual al peso del fluido desplazado. El bloque A desplaza más agua que el bloque B, de modo que el bloque A tiene la fuerza de flotación más alta.”

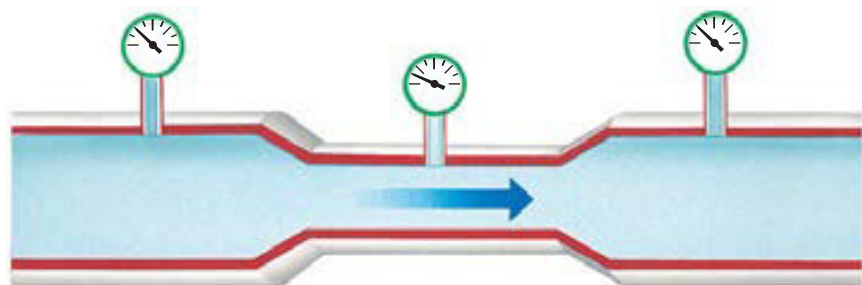
**¿Está usted de acuerdo con alguno de estos estudiantes?**

**Respuesta** Ashley tiene razón. El principio de Arquímedes *siempre* se aplica, sin tomar en cuenta si un objeto se hunde o flota. El bloque A desplaza más agua, de modo que experimenta una fuerza de flotación más alta. Diego comienza con ideas correctas, pero luego extrae una conclusión defectuosa. La fuerza de flotación sobre cualquiera de los bloques debe ser igual a la fuerza gravitacional sobre ese bloque (según la primera ley de Newton), de modo que el bloque A debe ser más pesado. Debido a que ambos bloques tienen el mismo volumen, el bloque A debe estar hecho con una madera más densa. Tal vez el bloque A está hecho de roble, y el bloque B está hecho de pino.

## Efecto de Bernoulli

La presión en un fluido inmóvil cambia con la profundidad, pero es igual si usted se mueve en forma horizontal. Sin embargo, si el fluido se mueve, la presión también cambia en dirección horizontal. Suponga que tiene un tubo con una sección estrecha, igual al presentado en la figura 8-11. Si colocamos medidores a lo largo del tubo, es sorprendente encontrar que la presión es más baja en la región estrecha del tubo. Si el fluido no se puede comprimir, debe moverse más rápido en la región

**Figura 8-11** La presión es más baja en la región estrecha del tubo, donde la velocidad del fluido es mayor.



## ¿Cuánta grasa tiene usted?

El ejercicio no reduce automáticamente su peso. Un resultado de ejercitarse es la conversión de tejido graso a músculo, sin que cambie su peso. Debido a que las personas saludables tienen más músculo, es importante poder determinar el porcentaje de grasa corporal. Esa es una pregunta que no responderá con sólo pararse en la báscula de su baño. Sin embargo, funciona una técnica de 2000 años de antigüedad desarrollada por Arquímedes.

Cerca del 250 a.C., Arquímedes era el científico principal para el rey Herón de Siracusa (la moderna Sicilia). Cuenta la historia que al rey le preocupaba que su corona no estuviera hecha de oro puro, sino que tuviera un poco de plata oculta bajo la superficie. Como no quería destruir su corona para encontrar que había sido engañado, desafió al científico para que encontrara un procedimiento alterno. Todos conocen la leyenda de que Arquímedes saltó de su tina de baño y gritó: “Eureka, lo encontré.”

La clave para la solución de Arquímedes es determinar la densidad promedio de la corona o, en nuestro caso, de su cuerpo. No hay problema para obtener su peso. Una simple báscula de baño sirve para esto. La parte complicada es determinar su volumen. Usted, igual que la corona del rey, tiene una forma irregular que no coincide con ninguno de los volúmenes geométricos que estudió en la escuela.

Arquímedes descubrió que un objeto inmerso en agua experimenta una fuerza de flotación hacia arriba. Si usted se parara en una báscula que estuviera totalmente sumergida, pesaría menos porque la fuerza de flotación soporta una parte de su peso. Esta fuerza de flotación es igual al peso



© Arne8001/Dreamstime

del agua que desplaza su cuerpo. A partir de sus pesos en el aire y bajo el agua, puede calcular su volumen.

Los científicos del desempeño humano consideran que el cuerpo está hecho de grasa y “músculos”. (Todo excepto la grasa —la piel, el hueso y los órganos— se agrupa como músculo.) A partir del estudio de cadáveres, se encontró que la densidad de la grasa humana es de aproximadamente 90% la densidad del agua, mientras que la densidad del “músculo” es cerca de 110% la densidad del agua. Entre más grasa tiene usted, más baja será su densidad promedio. El porcentaje de grasa para los adultos saludables debe estar entre 15 y 20% para los hombres y entre 22 y 28% para las mujeres. Los maratonistas y los ciclistas tienen alrededor de 5-8% de grasa.

estrecha; es decir, la misma cantidad de fluido debe pasar por cada segmento del tubo, o se acumularía. Por lo tanto, el fluido debe avanzar más rápido en las regiones estrechas. Esto puede hacer que uno deduzca incorrectamente que la presión sería más alta en esta región. El matemático y físico suizo Daniel Bernoulli expresó el resultado correcto como un principio.

La presión en un fluido disminuye conforme aumenta su velocidad.

◀ principio de Bernoulli

Podemos comprender el **principio de Bernoulli** al “observar” un pequeño cubo de fluido que se desplaza por el tubo (figura 8-12). El cubo debe adquirir energía cinética cuando acelera al entrar a la región estrecha. Debido a que no hay cambio en su energía gravitacional potencial, debe existir una fuerza neta sobre el cubo que actúe sobre él. Por lo tanto, la fuerza en la parte frontal del cubo debe ser menor que en la parte posterior. Es decir, la presión debe disminuir conforme



**Figura 8-12** El cubo de fluido que entra en la región estrecha del tubo debe experimentar una fuerza neta hacia la derecha.

## La pelota curva

Cuando una pelota avanza por el aire, ocurren cosas extrañas. Tal vez los ejemplos más comunes sean las curvas en la pelota del béisbol, el golpe con efecto del golf, y el servicio con efecto vertical del tenis. Isaac Newton escribió acerca del comportamiento inusual de las pelotas de tenis, y los jugadores del béisbol y los científicos han discutido el comportamiento de pelota curva desde la primera vez que se lanzó hace más de cien años. Las pelotas siguen naturalmente trayectorias de proyectil debido a la gravedad (capítulo 4), pero su movimiento adicional es la pérdida de todos los bateadores.

Desde el principio, el debate se centró en si al menos existía la pelota curva. Los científicos, con el convencimiento de que las únicas fuerzas sobre la pelota eran la gravedad y la resistencia del aire (la resistencia al avance), argumentaban que la pelota curva era sólo una ilusión óptica. “No es cierto”, replicaban los jugadores. “Es como si la pelota rodara sobre una mesa justo frente al plato.”

Cuando existe un debate acerca del mundo material, el mejor procedimiento es diseñar un experimento; es decir, formular las preguntas del mundo material mismo. A principios de la década de 1940, la revista *Life* encargó fotografías estroboscópicas de una pelota curva y concluyó que los científicos tenían razón: La pelota curva es una ilusión óptica. Para no quedarse atrás, la revista *Look* encargó sus propias fotografías y concluyó que los científicos (y la revista *Life*) estaban equivocados.

En época reciente, tres científicos reexaminaron la pregunta. Encontraron un almacén oscuro, un banco de luces estroboscópicas, y —lo más importante— un lanzador profesional. Después de un cuidadoso análisis, el veredicto estaba claro: La pelota realmente se aleja de la trayectoria de proyectil, con una desviación creada por el efecto de la pelota. Si la pelota viaja a 75 mph, tarda aproximadamente  $\frac{1}{2}$  segundo en recorrer los 60 pies hasta el bateador. Durante este tiempo, la pelota gira unas 18 veces y se desvía cerca de 1 pie de la trayectoria de proyectil.

La dirección de la desviación depende de la orientación del efecto. La desviación siempre es perpendicular al eje del efecto; por lo tanto, el efecto alrededor de un eje vertical mueve la pelota a la izquierda o a la derecha. Debido a que esto sólo cambiaría el punto de contacto con un bate horizontal, no es muy eficaz. Un efecto alrededor de un eje horizontal hace que la pelota suba o baje. Un efecto posterior (la parte inferior de la pelota se mueve hacia el bateador) hace que la pelota se mantenga encima de la trayectoria de proyectil, lo



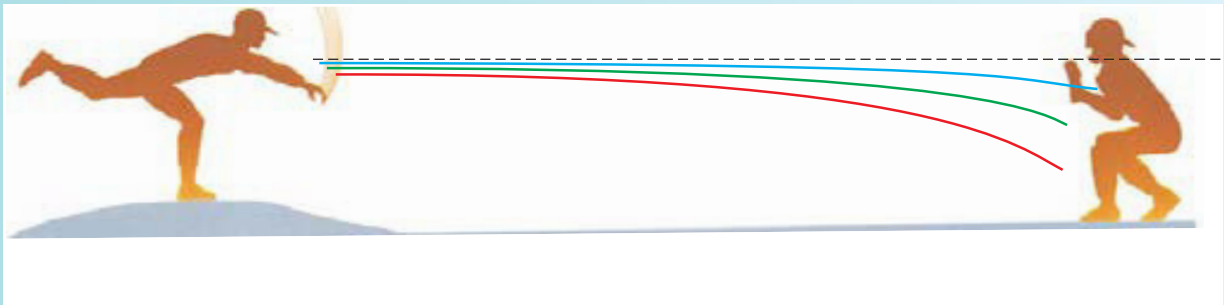
El giro de la pelota hace que el flujo de aire se desvíe hacia arriba, lo cual imparte una fuerza hacia abajo sobre la pelota.

cual ayuda al bateador. La mejor situación (para el lanzador) es el efecto vertical. Éste aumenta la resistencia al avance conforme la pelota se acerca al bateador.

Este experimento también responde la pregunta de cuándo se desvía la pelota. Los bateadores han afirmado que la pelota viaja sobre su trayectoria normal y después se desvía en el último momento. Los científicos afirman que las fuerzas —la gravedad y la provocada por el efecto— son constantes; otro tanto, la trayectoria es una curva continua. Nuestro estudio del movimiento de proyectil ha demostrado que una pelota rápida cae más lejos durante cada segundo sucesivo. Esto está formado por la resistencia al avance adicional debida al efecto. Por lo tanto, la rapidez vertical es mucho más rápida cerca del plato. Pero la resistencia al avance es continua; no cambia de manera abrupta.

Nos queda la pregunta de qué provoca la fuerza hacia abajo. Las costuras de algodón de la pelota de béisbol —216 en una pelota reglamentaria— atrapan aire, lo cual crea una capa de aire que se traslada alrededor de la pelota que gira. (Un insecto sentado en esa pelota que gira no sentiría el viento: igual que el movimiento giratorio no afecta el polvo sobre las aspas de un ventilador.) Para explicar la fuerza, debemos fijarnos en la turbulencia, o estela, detrás de la pelota. El flujo de aire sobre la parte superior de la pelota tiene una velocidad más alta respecto al aire circundante y se desvía más pronto que el flujo de aire bajo la parte inferior, como se aprecia en la figura. Esto hace que la estela detrás de la pelota cambie hacia arriba. De acuerdo con la tercera ley de Newton, el momento impartido a la estela en dirección hacia arriba provoca que se imparta un momento igual en dirección hacia abajo sobre la pelota, por lo cual desciende.

¡A jugar!



La curva azul representa la trayectoria de la pelota debido a su efecto sin ninguna gravedad. La curva verde es la trayectoria de la pelota debida a la gravedad, sin efecto. La curva roja muestra el producto combinado del efecto y la gravedad.

el cubo avanza en la región estrecha. Cuando el cubo de fluido sale de la región estrecha, se frena. Por lo tanto, la presión debe aumentar de nuevo.

Existen muchos ejemplos del efecto de Bernoulli en nuestras actividades cotidianas. El humo asciende por una chimenea, en parte, porque el aire caliente asciende, pero también por el efecto de Bernoulli. El viento que sopla sobre la parte superior de la chimenea reduce la presión y permite que el humo se impulse hacia arriba. Este efecto también es responsable de las casas que pierden los tejados durante los tornados (o durante los ataques de un lobo malvado). Cuando un tornado reduce la presión sobre la parte superior del tejado, el aire dentro de la casa arranca el tejado.

Un fluido que se mueve más allá de un objeto equivale a que el objeto se mueva en el fluido, de modo que el efecto de Bernoulli debe ocurrir en estas situaciones. Una lona sobre la parte trasera de un camión se levanta cuando el camión recorre un camino, debido a la menor presión en la superficie exterior de la lona producida por el paso del camión por el aire. Este mismo efecto hace que su automóvil sea succionado hacia un camión cuando pasa junto a usted en la dirección opuesta. Las superficies superiores de las alas de los aviones son curvas para que el aire tenga que viajar una distancia mayor para llegar al borde posterior del ala. Por lo tanto, el aire de la parte superior del ala debe viajar más rápido que el de la parte inferior y la presión sobre la parte superior del ala es menor, lo cual aporta sustentación para mantener el avión en el aire.

#### FÍSICA | HÁGALO USTED MISMO

Sostenga una hoja de papel frente a su cara, igual que en la figura 8-13. ¿Qué ocurre cuando sopla sobre la parte superior del papel? ¿Por qué?

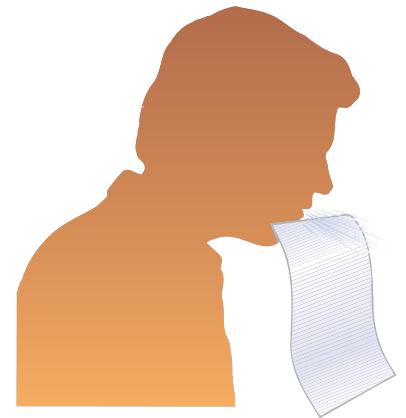
#### FÍSICA | HÁGALO USTED MISMO

Algunas aspiradoras se pueden invertir para que soplen aire. Si tiene acceso a una de esas aspiradoras, ponga una pelota de tenis de mesa en la corriente de aire cuando apunte verticalmente hacia arriba. ¿Por qué la pelota permanece en la corriente? ¿Puede inclinar la corriente de aire sin dejar caer la pelota? Este proyecto también se hace al soplar por un popote.



© Judy Kemmer/Shutterstock

Un tornado provocó la diferencia en las presiones de aire en el interior y el exterior de esta casa, de la cual arrancó el tejado.



**Figura 8-13** ¿Qué ocurre cuando usted sopla sobre la parte superior del papel?

## Resumen

La densidad es una propiedad inherente de una sustancia y se define como la cantidad de masa en una unidad de volumen.

Los elementos se combinan en sustancias que existen en cuatro estados de la materia: sólidos, líquidos, gases y plasmas. Las transiciones entre los estados ocurren cuando se aporta o toma energía de las sustancias. Cuando un sólido se calienta sobre su punto de fusión, los enlaces interatómicos se rompen para formar un líquido en el cual los átomos y las moléculas se mueven con libertad. Después de un calentamiento adicional, las moléculas se separan por completo para formar un gas. En un estado de plasma los átomos se han dividido y producen iones y electrones cargados. Aunque raro en la Tierra, el plasma es el estado más común en el universo.

Las fuerzas eléctricas entre los átomos unen todos los materiales. Si los átomos se ordenan, se produce una estructura cristalina. Los líquidos adoptan la forma de su recipiente, y casi todos carecen de una organización ordenada de sus moléculas. Las fuerzas intermoleculares en un líquido crean una tensión superficial que contiene las moléculas del líquido. Un gas llena el recipiente que lo contiene, y asume su forma y volumen. Todos los gases se pueden comprimir y se mezclan fácilmente entre sí. La viscosidad de un fluido determina con cuánta facilidad se vierte y cuánta resistencia ofrece a los objetos que lo atraviesan.



La presión en un líquido o gas varía con la profundidad, debido al peso del fluido encima de ese punto. Al nivel del mar, la presión atmosférica promedio es de cerca de 101 kilopascales (14.7 libras por pulgada cuadrada).

Un objeto dentro de un fluido experimenta una fuerza de flotación igual al peso que desplazó el fluido; por lo tanto, todos los objetos pesan menos en el agua que en el aire. La fuerza de flotación existe porque la presión en un fluido varía con la profundidad. La presión sobre la superficie inferior de un objeto es mayor que la que se aplica sobre su superficie superior. Los objetos menos densos que el fluido, flotan. La presión en un fluido que se mueven disminuye cuando aumenta la velocidad.

## Capítulo 8



## Revisión

La forma macroscópica de los cristales es el resultado de un proceso de crecimiento que se agrega a la estructura general del cristal, átomo por átomo. Un estudio de estas formas cristalinas da indicios a los científicos acerca del modo en que se combinan los átomos.

## TÉRMINOS IMPORTANTES

**cristal:** Un material en el cual los átomos están ordenados en un esquema geométrico definido.

**densidad:** Una propiedad de un material igual a la masa del material dividida entre su volumen. Se mide en kilogramos por metro cúbico.

**fuerza de flotación:** La fuerza hacia arriba que ejerce un fluido sobre un objeto sumergido o flotante. (Consulte principio de Arquímedes.)

**gas:** La materia sin una forma o un volumen definidos.

**líquido:** La materia con un volumen definido que adopta la forma de su recipiente.

**plasma:** Un gas muy ionizado con números iguales de cargas positivas y negativas.

**principio de Arquímedes:** La fuerza de flotación es igual al peso del fluido desplazado.

**principio de Bernoulli:** La presión en un fluido aumenta conforme disminuye su velocidad.

**sólido:** La materia con un tamaño y forma definidos.

**viscosidad:** Una medida de la fricción interna dentro de un fluido.

## PREGUNTAS CONCEPTUALES

1. ¿Cuáles son los cuatro estados de la materia?
2. ¿La energía cinética promedio de las moléculas en un líquido es mayor o menor que en un sólido del mismo material? ¿Por qué?
3. ¿Qué tiene la densidad más alta: el aluminio en una lata de refresco o en el motor de un automóvil? ¿Por qué?
4. ¿Cuál tiene una densidad más alta, un diminuto diamante industrial que sirve para pulverizar o un diamante de tres quilates en un anillo de compromiso? Explique.
5. El aluminio y el magnesio tienen densidades de 2.70 y 1.75 gramos por centímetro cúbico, respectivamente. Si usted tiene masas iguales de cada uno, ¿cuál ocupará el mayor volumen? Explique.
6. El oro y la plata tienen densidades de 19.3 y 10.5 gramos por centímetro cúbico, respectivamente. Si usted tiene volúmenes iguales de cada uno, ¿cuál tendrá la masa más grande? Explique.
7. Aunque un átomo de uranio tiene más masa que un átomo de oro, el oro tiene la densidad más alta. ¿Qué le dice esto acerca de los dos sólidos?
8. ¿Por qué se rompen las botellas de refresco cuando se congela el contenido?
9. ¿Las estructuras de cristales de hielo y de sal de mesa son iguales? ¿Cómo lo sabe?





10. ¿Cuál es la diferencia entre la estructura de cristal de la mica y la de la sal de mesa?
11. ¿Cuál es la diferencia entre la estructura de un diamante y la del grafito?
12. ¿Qué le dice acerca de la estructura de cristales la observación de que la mica se puede separar en hojas delgadas?
13. ¿Qué evidencia tiene que indique que la unión molecular en el oxígeno sólido es menor que en el nitrógeno sólido?
14. ¿La unión entre las moléculas en el nitrógeno líquido es más fuerte o más débil que la del oxígeno líquido? Explique.
15. ¿Cuál forma esperaría que adoptara una gota de agua si estuviera suspendida en el aire en un transbordador espacial?
16. ¿Por qué el agua forma gotas cuando se derrama sobre un piso encerado?



© Henry Becker/Dreamstime

17. Si usted llena un vaso con agua al mismo nivel que la parte superior del vaso, puede colocar con cuidado varias monedas sobre el vaso sin derramar agua. ¿Cómo explica esto?



© George Sample

18. ¿Por qué el agua jabonosa forma menos gotas que el agua simple sobre un mostrador?
19. Cuando usted llena un vaso a la mitad con agua, el agua se desliza hacia arriba donde se junta con el vaso. ¿Qué puede deducir acerca de las intensidades relativas de las fuerzas entre las moléculas de agua y las fuerzas adhesivas entre las moléculas de agua y el vaso?

20. Cuando usted llena un vaso a la mitad con mercurio, el mercurio se dobla hacia donde se junta con el vaso. ¿Qué puede deducir acerca de las intensidades relativas de las fuerzas entre los átomos de mercurio y las fuerzas adhesivas entre los átomos de mercurio y el vaso? (*Advertencia: el mercurio es tóxico y no debe manipularse.*)

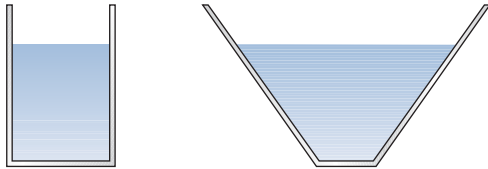


© Charles D. Winters

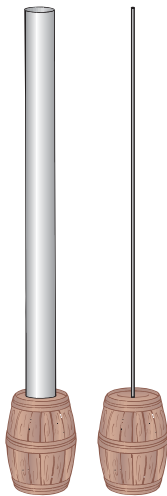
Preguntas 19 y 20

21. ¿Cuál es la diferencia entre un gas y un plasma?
22. ¿Cuál estado de la materia forma los cinturones de Van Allen?
23. Utilice el concepto de presión para explicar por qué es más cómodo caminar descalzo sobre un sendero pavimentado que sobre un sendero con arcilla.
24. ¿Qué le debe ocurrir al área de un neumático que toca el suelo si reduce la presión en el neumático? Explique.
25. Coloque una pequeña cantidad de agua en una lata de 1 galón y haga que hierva rápido. Puede quitar la lata de la estufa y atornillar la tapa con firmeza (el orden es importante aquí). Cuando se enfría el vapor, se condensa como agua, lo cual hace que la lata se colapse. ¿Por qué?
26. A nivel del mar, cada pulgada cuadrada de superficie experimenta una fuerza de 14.7 libras debido a la presión del aire. Usted lleva una bandeja que contiene galletas con chispas de chocolate. El área de superficie de la bandeja son 250 pulgadas cuadradas, lo que significa que la fuerza hacia abajo que ejerce la columna de aire sobre la bandeja son 3675 libras. ¿Por qué la bandeja no se siente tan pesada?
27. Usted repite el experimento de Von Guericke (consulte la figura 8-8) con mitades de esferas todavía más pequeñas y encuentra que los dos equipos de ocho caballos son lo bastante fuertes para separar las esferas. Después transporta el equipo a Denver, que tiene una altitud de 1 milla. ¿Necesitará más o menos caballos para separar las mitades de esferas? ¿Por qué?
28. Un compañero explica que si su báscula de baño indica 150 libras cuando usted está a nivel del mar, señalará sólo 75 libras arriba de una montaña de 18 000 pies, en donde la presión atmosférica se reduce a la mitad. ¿Qué tiene de incorrecto el razonamiento de su compañero? ¿Esperaría que la lectura de la báscula se redujera por completo como resultado de la disminución en la presión atmosférica?

29. En un mapa del clima, observa áreas de presión baja marcadas con una L y áreas de presión alta marcadas con una H. Por convención, las presiones mencionadas siempre se corrigen al valor que tendrían a nivel del mar. Si este no fuera el caso, ¿cuál letra vería de manera permanente sobre Denver, la ciudad con una altitud de una milla? Explique.
- ▲ 30. Los alpinistas suelen llevar altímetros para determinar la altitud mediante la presión atmosférica. Si avanza un sistema climatológico de baja presión, ¿el altímetro comunicará una altitud más alta o más baja que la verdadera? Explique.
31. ¿Sus oídos van a dolerle más debido a la presión del agua si nada bajo 12 pies en su alberca o bajo 12 pies en medio del Lago Superior? Explique.
32. ¿Por qué la presión del agua no aplasta a un buzo a una profundidad de 30 metros?
33. Compare las presiones en la parte inferior de los dos recipientes que se presentan a continuación. Suponga que ambos están llenos a la misma profundidad con el mismo fluido.



34. En dos barriles de madera idénticos se instalaron tubos largos en la parte superior. El tubo del primer barril tiene 1 pie de diámetro, y el tubo del segundo barril sólo tiene  $\frac{1}{2}$  pulgada de diámetro. Cuando el tubo más grande se llena con agua a una altura de 20 pies, el barril estalla. Para que estalle el segundo barril, ¿tendrá que agregarse agua a una altura menor, igual, mayor que 20 pies? Explique.



35. El agua dulce tiene una densidad de 1000 kg por metro cúbico a 4°C y 998 kg por metro cúbico a 20°C. ¿En cuál temperatura del agua usted sentiría mayor presión a una profundidad de 10 metros? ¿Por qué?
- ▲ 36. El agua salada es más densa que el agua dulce. Esto significa que la masa de 1 centímetro cúbico de agua salada es mayor que la de 1 centímetro cúbico de agua dulce. ¿Un

- buzo tendría que nadar más profundo en agua salada o en agua dulce para alcanzar la misma presión? ¿Por qué?
37. ¿Por qué no puede succionarse agua a una altura mayor de 10 metros incluso con una buena bomba de succión?
38. A nivel del mar, incluso un vacío perfecto sólo puede elevar el agua 10 metros por un popote. A una altitud de 5000 pies en Bozeman, Montana, ¿puede elevarse agua a una altura mayor, igual o menor de 10 metros? Explique su razonamiento.
39. Si tiene un pozo de agua que es mucho más profundo que 5 metros, pone la bomba en la parte inferior del pozo y hace que impulse el agua hacia arriba. ¿Por qué esto es mejor que colocar la bomba en la parte superior?
40. Coloca un popote largo en un vaso con agua y encuentra que, sin importar con cuánta fuerza absorba, no puede beber el agua. Pon el mismo popote en un líquido desconocido X y encuentra que puede beber. Si combina el líquido X y el agua en un vaso, ¿cuál flotará sobre la superficie?
41. Algunos juguetes contienen líquidos de dos colores diferentes que no se mezclan. Si el líquido morado siempre se hunde en el líquido transparente, tal como se aprecia en el juguete, ¿qué puede decir acerca de las densidades de los líquidos?



42. La gasolina derramada a veces se ve como una película de colores sobre los charcos de lluvia. ¿Qué le dice esto acerca de la densidad de la gasolina?
43. El agua salada es ligeramente más densa que el agua dulce. ¿Una embarcación flotará más alto en agua salada o en agua dulce?
44. Utilice el principio de Arquímedes para explicar por qué un carguero vacío se sienta más alto en el agua que uno cargado.
45. El agua salada es ligeramente más densa que el agua dulce. ¿Una embarcación de 50 toneladas experimentará una fuerza de flotación más alta en un lago de agua dulce o en el océano?
46. El agua salada es ligeramente más densa que el agua dulce. ¿Una bola de boliche de 12 libras experimentará una fuerza de flotación más alta asentada en el fondo de un lago de agua dulce o en el fondo del océano?
47. Cuando sopla el aire de sus pulmones, modifica su masa y su volumen. ¿Cuál de estos efectos explica por qué esto provoca que usted se hunda hacia el fondo de la alberca?

48. ¿Qué le ocurre a la profundidad de un buzo que respira muy profundo?
49. Utilice los datos de la tabla 8-1 para determinar si un bloque de plomo flotaría en un lago de mercurio líquido. ¿Y un bloque de oro? (*Advertencia: no intente este experimento; el mercurio es muy tóxico.*)
50. Utilice los datos de la tabla 8-1 para determinar qué flotaría más alto en un lago de mercurio, un bloque de cobre o un bloque de plata.
51. Un submarino puede subir a la superficie al aumentar la fuerza de flotación o al reducir el peso. Cuando los tanques de lastre de un submarino se vacían, ¿qué ocurre?
- ▲ 52. Un buzo logra una flotación neutra al ajustar el volumen de aire en su chaleco de modo que la fuerza de flotación sea igual a su peso. Si después patea y nada hacia abajo 20 pies adicionales, ¿ahora la fuerza será hacia arriba, cero, o hacia abajo? Explique.
53. Posee dos cubos del mismo tamaño, uno hecho de aluminio y el otro de plomo. Ambos cubos se pueden hundir hasta el fondo de un acuario lleno con agua. ¿Cuál cubo, si es el caso, experimenta una fuerza de flotación más alta? ¿Por qué?
54. Tiene dos cubos del mismo tamaño, uno hecho de madera y el otro de aluminio. Ambos cubos se colocan en un acuario lleno con agua. El bloque de madera flota, y el de aluminio se hunde. ¿Cuál cubo, si es el caso, experimenta una fuerza de flotación más alta?
- ▲ 55. Un cubo de hielo flota en un vaso con agua. ¿El nivel del agua en el vaso se elevará, bajará, o permanecerá igual cuando se derrita el cubo? ¿Por qué?
- ▲ 56. Está sentado en una lancha en su alberca. Hay seis lingotes de oro en su lancha. (¡Usted es millonario!) Si lanza el oro a la alberca, ¿el nivel de agua de la alberca sube, baja, o permanece igual? Explique.
57. Pone una moneda plana sobre un mostrador a dos pulgadas de la orilla. Con su boca cerca de la orilla de la mesa, sopla con fuerza sobre la moneda. ¿Por qué la moneda da una vuelta en el aire? Intente esto.
58. ¿Por qué su automóvil experimenta una atracción hacia un lado del camino cuando un camión pasa junto a usted en la dirección opuesta en una carretera de dos carriles?
59. ¿Por qué los jugadores de tenis de mesa aplican mucho efecto a sus tiros?

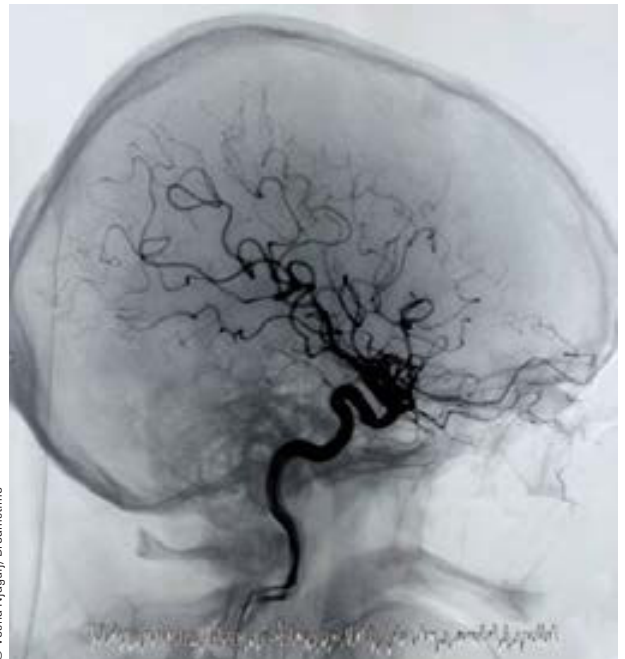


© Gabriel Mitrache/Shutterstock

60. Es posible crear un vacío parcial al instalar un tubo en un ángulo recto a una llave de agua y luego abrir el agua, como se aprecia en la figura. ¿Cuál es la física detrás de esto?



61. El Edificio Verde en el Massachusetts Institute of Technology (MIT) es una torre alta construida sobre una base con forma de U invertida que está abierta a la cuenca del río Charles. ¿Por qué las puertas en la entrada se abrían “solas” en los días de viento antes que se instalaran puertas giratorias para corregir el defecto en el diseño?
62. ¿Por qué un aneurisma (un ensanchamiento de una arteria) tiene una alta propensión a romperse?



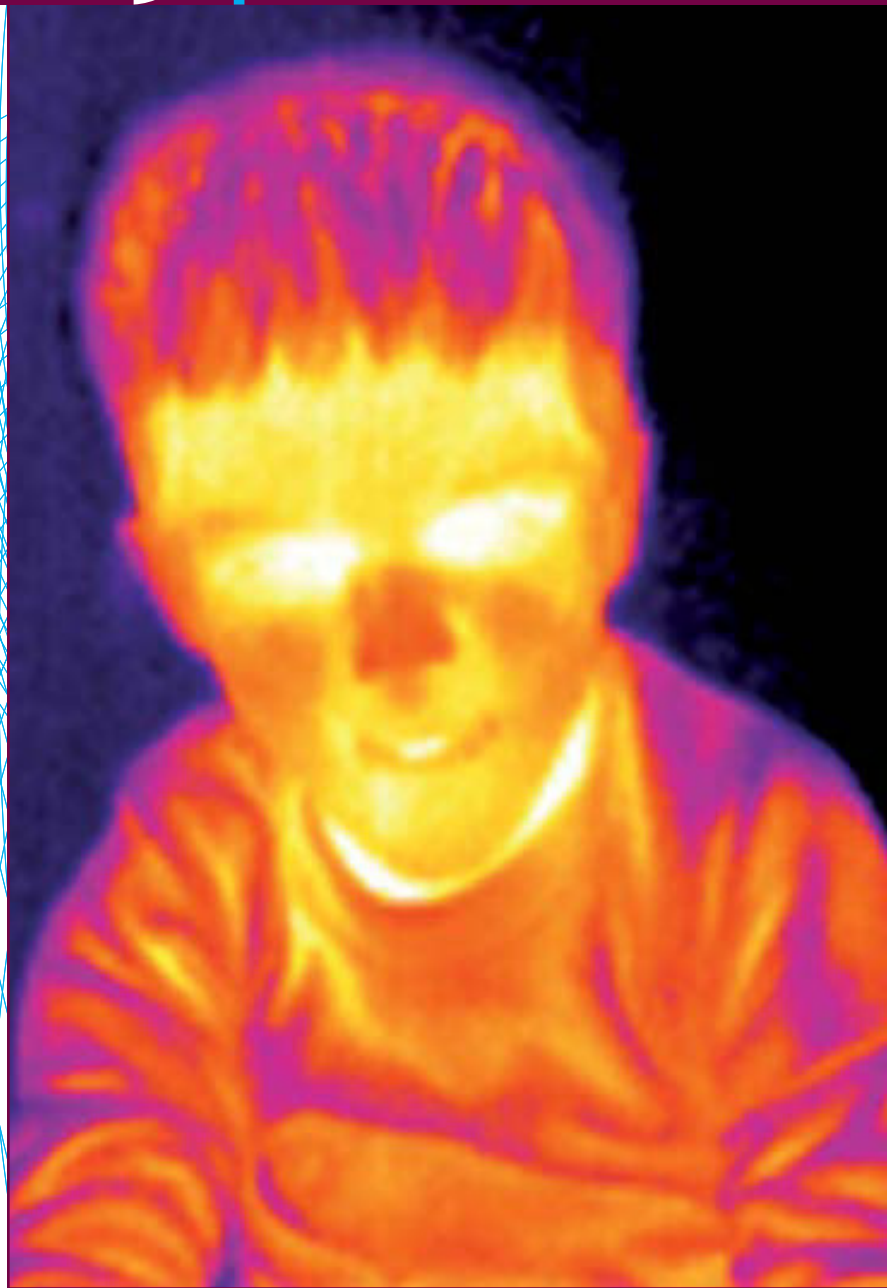
© Vasna Njaguli/Dreamstime

## EJERCICIOS

1. ¿Cuál es la densidad de una sustancia que tiene una masa de 84 g y un volumen de  $8 \text{ cm}^3$ ? Utilice la tabla 8-1 para identificar esta sustancia.
2. Una pelota pequeña tiene una masa de 6.75 g y un volumen de  $0.3 \text{ cm}^3$ . ¿Puede identificar el material con la tabla 8-1?
3. Un trofeo de bolos tiene una masa de 180 g. Cuando se pone en el agua, el trofeo desplaza  $600 \text{ cm}^3$ . ¿Cuál es la densidad promedio del trofeo?
4. Si la corona de Arquímedes tuviera una masa de 1 kg y un volumen de  $120 \text{ cm}^3$ , ¿la corona estaría hecha de oro puro? Explique.
5. Una pelota densa con un volumen de  $0.4 \text{ m}^3$  está hecha de un material con una densidad de  $3000 \text{ kg/m}^3$ . ¿Cuál es la masa de la pelota?
6. ¿Cuál es la masa de una excavadora de plomo que tiene un volumen de  $3 \text{ cm}^3$ ?
7. Dado que casi todas las personas pueden flotar naturalmente, es razonable estimar que la densidad del cuerpo humano está cerca de ser igual que la del agua. Utilice esta suposición para encontrar el volumen de una persona de 90 kg.
8. Un cubo con una masa de 48 g está hecho de un metal con una densidad de  $6 \text{ g/cm}^3$ . ¿Cuál es el volumen del cubo y cuál es la longitud de cada borde?
9. Si  $1000 \text{ cm}^3$  de un gas con una densidad de  $0.0009 \text{ g/cm}^3$  se condensan como un líquido con una densidad de  $0.9 \text{ g/cm}^3$ , ¿cuál es el volumen del líquido?
10. Un cubo de hielo, de 10 cm en cada lado, se funde en una taza medidora. ¿Cuál es el volumen del agua líquida?
11. Calcule el peso de una columna de agua dulce con un área transversal de  $1 \text{ m}^2$  y una altura de 10 m. ¿Cuál presión crea esto en la parte inferior de la columna de agua? ¿Cómo se compara esto con la presión atmosférica?
12. Calcule la altura de una columna de mercurio con un área transversal de  $1 \text{ m}^2$  de modo que tenga el mismo peso que la columna de agua del ejercicio 11.
13. Dado que la presión atmosférica desciende por un factor de 2 por cada aumento de 18 000 pies en la altitud, ¿cuál es la altura de una columna de mercurio en un barómetro ubicado en un compartimiento despresurizado de un avión que vuela a 36 000 pies de altura?
- ▲ 14. Dos barómetros están hechos con agua y mercurio. Si la columna de mercurio tiene una altura de 30 pulgadas, ¿cuál es la altura de la columna de agua?
- ▲ 15. Cada pulgada cúbica de mercurio tiene un peso de 0.5 lb. ¿Cuál es la presión en la parte inferior de una columna de mercurio de 30 pulgadas de alto si existe un vacío sobre el mercurio?
- ▲ 16. Si  $1 \text{ m}^3$  de agua tiene una masa de 1000 kg, ¿cuál es la presión a una profundidad de 150 m? ¿Es importante la presión atmosférica?
17. Un objeto tiene una masa de 150 kg y un volumen de  $0.2 \text{ m}^3$ . ¿Cuál es su densidad promedio? ¿Este objeto se hundirá o flotará en el agua?
18. ¿Flotará un objeto con una masa de 1000 kg y un volumen de  $1.6 \text{ m}^3$ ?
19. Un bloque de madera de 500 g se baja con cuidado sobre un vaso de precipitado completamente lleno con agua y flota. ¿Cuál es el peso del agua, en newtons, que se derrama fuera del vaso de precipitado?
20. Un bloque de  $400 \text{ cm}^3$  de aluminio ( $D = 2.7 \text{ g/cm}^3$ ) se baja con cuidado sobre un vaso de precipitado completamente lleno con agua. ¿Cuál es el peso del agua, en newtons, que se derrama fuera del vaso de precipitado?
21. Una bola de cera se baja con cuidado sobre un vaso de precipitado completamente lleno con agua, en donde flota. Esto hace que se derramen  $18 \text{ cm}^3$  de agua. La misma bola de cera se baja después con cuidado sobre un vaso de precipitado completamente lleno con alcohol etílico ( $D = 0.79 \text{ g/cm}^3$ ), en donde se hunde, y hace que se derramen  $20 \text{ cm}^3$  de alcohol. ¿Cuál de estos dos experimentos le permite encontrar la masa de la cera, y cuál le permite determinar su volumen? Encuentre la densidad de la cera.
22. Un objeto amarillo se baja con cuidado sobre un vaso de precipitado completamente lleno con agua, donde flota. Esto hace que se derramen  $28 \text{ cm}^3$  de agua. Después el mismo objeto se baja con cuidado sobre un vaso de precipitado completamente lleno con gasolina ( $D = 0.68 \text{ g/cm}^3$ ), en donde se hunde, y hace que se derramen  $40 \text{ cm}^3$  de gasolina. ¿En cuál líquido el objeto amarillo experimenta la fuerza de flotación más alta?
23. Un metro cúbico de cobre tiene una masa de 8930 kg. El bloque de cobre se baja a un lago mediante un cable fuerte, hasta que está completamente sumergido. Dibuje un diagrama de cuerpo libre para el bloque. Determine la fuerza de flotación sobre el bloque y la tensión en el cable.
24. Una pelota completamente sumergida en una tina de baño tiene un volumen de  $5 \text{ cm}^3$  y una masa de 30 g. Dibuje un diagrama de cuerpo libre para la pelota. ¿Cuál es la fuerza normal de la tina sobre la pelota?



# 9 Energía térmica



© Carla F. Castagno/Dreamstime

*Termografía de colores falsos de un cuerpo humano.*

Esta termografía de colores falsos de un cuerpo humano muestra las variaciones de la temperatura de la superficie. ¿Cuáles factores controlan la velocidad con la que se emite o se absorbe la radiación y los cambios de temperatura resultantes?

---

(Consulte la respuesta a esta pregunta en la página 172.)

---



**S**i examinamos con atención cualquier sistema de objetos que se mueven o si lo observamos bastante tiempo, encontramos que la energía mecánica no se conserva. La pesa de un péndulo que se balancea de un lado a otro termina por quedar en reposo. Su energía mecánica original desaparece.

Otros ejemplos muestran lo mismo. Frota sus manos. Está haciendo un trabajo —aplicar una fuerza sobre una distancia— pero es evidente que sus manos no se desprenden con una energía cinética recién hallada. Asimismo, tome un martillo y golpee varias veces una superficie metálica. El martillo en movimiento tiene energía cinética, pero después de golpear la superficie, su energía cinética desaparece. ¿Qué le ocurre a la energía? No se convierte a energía potencial, como ocurrió en el capítulo 6, porque la energía no vuelve a aparecer. De modo que la energía cinética en realidad desaparece y no se conserva la energía total o se transfiere alguna forma de energía que no es una energía potencial.

Existen semejanzas en los ejemplos presentados. Cuando frota sus manos, siente calor. La superficie metálica y el martillo también se calientan cuando chocan. La pesa del péndulo no es tan obvia; ocurren interacciones entre la pesa y las moléculas de aire circundantes y entre la cuerda y el soporte. Pero un examen más atento demuestra que, una vez más, el sistema se calienta.

A primera vista es tentador sugerir que la temperatura, o tal vez el cambio en la temperatura, puede equipararse con la energía perdida. Sin embargo, ninguna de estas ideas funciona. Si se gasta la misma cantidad de energía en un conjunto de objetos diferentes, los aumentos de temperatura resultantes no son iguales. Por ejemplo, suponga que frotamos dos bloques de cobre. La temperatura de los bloques aumenta. Si repetimos el experimento para gastar la misma cantidad de energía mecánica con dos bloques de aluminio, el cambio en la temperatura no será igual. El cambio en la temperatura es un indicio de que algo ha ocurrido, pero no es igual a la energía perdida.

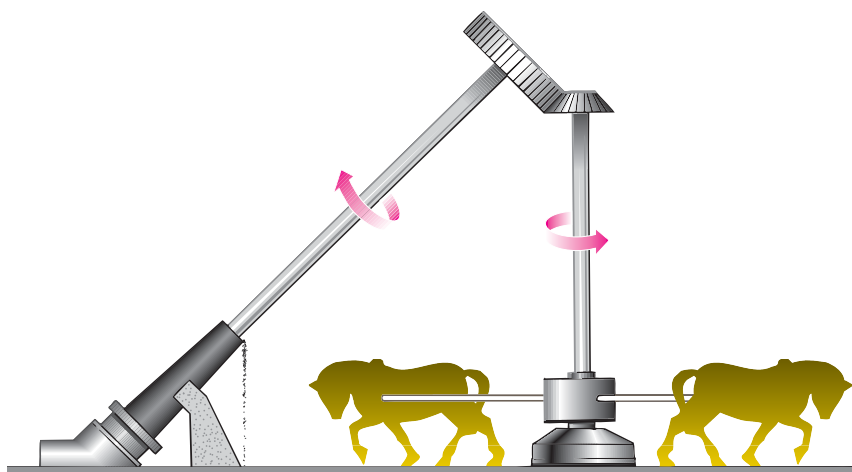
## La naturaleza del calor

Las primeras ideas acerca de la naturaleza del calor se centraban en la existencia de un fluido que supuestamente se transfería entre los objetos a diferentes temperaturas. Durante siglos, las personas habían observado que una tetera podría calentarse mucho, hervir y generar vapor, o que un banco de nieve podía absorber el calor del Sol durante un periodo largo y derretirse lentamente. El fuego transfería algo al agua caliente para hacerla hervir; los rayos del Sol impartían algo a la nieve para derretirla con el paso del tiempo. Este “fluido” se estudió intensamente en la época de la tecnología de los primeros motores de vapor. Se denominó *calórica*, a partir de la palabra latina *calor*. Era invisible y se suponía que no tenía masa, porque los experimentadores no detectaban ningún cambio en la masa de un objeto calentado.

El conde Rumford, un científico británico del siglo XVIII, promovió un estudio del trabajo y el calor. En esa época estaba a cargo de perforar cañones en un arsenal militar en Munich, y se sorprendió con la enorme cantidad de calor que se producía durante el proceso de barrenado. Rumford decidió investigar esto. Puso un barreno romo y un cilindro de bronce en un barril lleno con agua fría. El barreno fue incrustado en el fondo del cilindro y dos caballos lo hicieron girar. Éstos son los resultados descritos por Rumford:

Al final de 2 horas y 30 minutos (el agua en el barril) ¡realmente hirvió!... Sería difícil describir la sorpresa y el asombro expresado por los rostros de los espectadores, al ver que se calentaba a una cantidad tan grande de agua fría, y que incluso hirvió sin ningún fuego.

Rumford demostró que era posible producir cantidades grandes de calor mediante mecánica, sin fuego, luz, o reacción química. (Ésta es una versión a gran escala del sencillo experimento de frotarse las manos.) La importancia de este experimento fue la comprobación de que la producción de calor parecía inagotable. Mientras los caballos giraran el barreno, se generaba calor sin ningún límite. Concluyó que todo lo que podía producirse sin límite no era posible que fuera



Rumford investigó la naturaleza del calor mientras perforaba cañones.

una sustancia material. El calor no era un fluido, sino algo generado mediante el movimiento.

En nuestra moderna visión del mundo de la física, el **calor** es una energía que *fluye* entre dos objetos debido a una diferencia en la temperatura. Medimos la cantidad de energía que adquiere o pierde un objeto con el cambio de temperatura resultante en el objeto. Por convención, 1 **caloría** (cal) se define como la cantidad de calor que eleva 1°C la temperatura de 1 gramo de agua. En el sistema acostumbrado en EUA, la unidad de calor, llamada **unidad térmica británica** (Btu), es la cantidad necesaria para elevar 1°F la temperatura de 1 libra de agua. Una unidad térmica británica es aproximadamente igual a 252 calorías.

**Pregunta** ¿Cuántas calorías se requieren para aumentar 5°C la temperatura de 8 gramos de agua?

**Respuesta** Para elevar 5°C la temperatura de 1 gramo se requieren 5 calorías. Por lo tanto, 8 gramos requieren  $5 \text{ calorías/gramo} \times 8 \text{ gramos} = 40 \text{ calorías}$ .

✓ El suplemento *Problem Solving* (Solución de problemas) ofrece una presentación extendida sobre el trabajo mecánico y el calor.

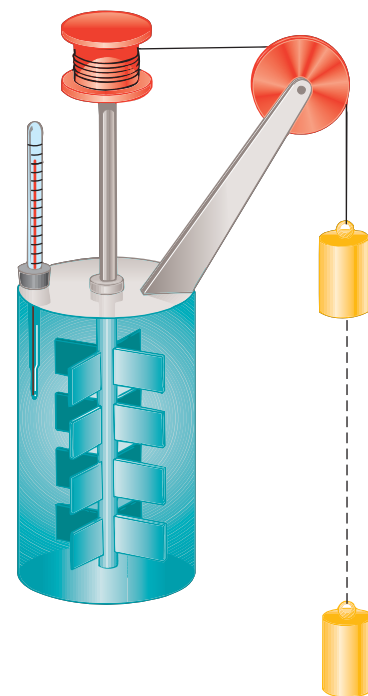
## Trabajo mecánico y calor

✓ **MATEMÁTICAS**

El experimento de Rumford utiliza el *trabajo* que aportan los caballos para aumentar la temperatura del agua, lo que demuestra claramente un modo equivalente de calentar el agua. El agua se calentó *como* si se hubiera utilizado un fuego, pero éste no se aplicó.

Existe una estrecha relación entre el trabajo y el calor. Ambos se miden en unidades de energía, pero ninguno reside en un objeto. En el capítulo 6, vimos que el trabajo era una medida de la energía “que fluye” de una forma a otra. Por ejemplo, la fuerza gravitacional funciona sobre una pelota en caída libre, lo cual hace que aumente su energía cinética; por lo tanto, la energía potencial se convierte en energía cinética. Asimismo, el calor no reside en un objeto, sino que fluye hacia o desde un objeto, y cambia la energía interna del objeto. Esta energía interna también se conoce como **energía térmica**, y el área de la física que atiende las relaciones entre el calor y otras formas de energía se denomina **termodinámica**.

Aunque el experimento de Rumford sugería una equivalencia entre el trabajo mecánico y el calor, James Joule descubrió la equivalencia cuantitativa 50 años después. El experimento de Joule utilizó un recipiente con agua y una estructura de rueda con paletas similar a lo que se presenta en la figura 9-1. Las paletas se conectan mediante poleas a una pesa. Cuando la pesa cae, gira la rueda de paletas, y la temperatura del agua asciende. La energía potencial perdida por la pesa que cae produce un aumento en la temperatura del agua. Debido a que Joule podía elevar la temperatura del agua al calentarla o al utilizar las pesas que caían, pudo establecer



**Figura 9-1** El aparato de Joule para determinar la equivalencia de trabajo y calor. La disminución en la energía gravitacional potencial de la masa que cae produce un aumento en la temperatura del agua.

1 caloría = 4.2 joules ➤

la equivalencia entre el trabajo realizado y el calor transferido. El experimento de Joule demostró que 4.2 joules de trabajo equivalen a 1 caloría de calor.

Existen otras unidades de energía. La Caloría utilizada para referirse al contenido energético de un alimento no es la misma que la caloría definida aquí. La Caloría alimentaria (designada adecuadamente con una C mayúscula para diferenciarla de la que se emplea en la física) es igual a 1000 calorías de la física. Un pedazo de tarta valorado en 400 Calorías equivale a 400 000 calorías de energía térmica, o casi 1.7 millones de joules de energía mecánica.

---

**Pregunta** Debido a que los joules y las calorías son unidades de energía, ¿necesitamos conservar los dos?

---

**Respuesta** No. Sin embargo, en la actualidad los dos se utilizan por razones históricas. Los europeos están muy lejos de los estadounidenses en cuanto a convertir las Calorías en kilojoules en las etiquetas de los alimentos.

---

## Revisión de temperatura

Si juntamos dos objetos con diferentes temperaturas, ocurre un flujo de energía entre ellos, y la energía fluye del objeto más caliente al más frío. Sabemos, a partir de la estructura de la materia, que las moléculas del objeto más caliente tienen una energía cinética promedio más alta. Por lo tanto, en promedio, las partículas más energéticas del objeto más caliente pierden una parte de su energía cinética cuando chocan con las partículas menos energéticas del objeto más frío. La energía cinética promedio de las partículas del objeto más caliente disminuye y la de las partículas del objeto más frío aumenta, hasta que se igualan. En una escala macroscópica, la temperatura cambia para cada objeto: disminuye la temperatura del objeto más caliente, y aumenta la temperatura del objeto más frío. El flujo de energía se detiene cuando los dos objetos alcanzan la misma temperatura, una condición conocida como **equilibrio térmico**. Las colisiones atómicas todavía ocurren pero, en promedio, las partículas no adquieren ni pierden energía cinética.

Supongamos que tenemos dos objetos, denominados A y B, que no pueden ponerse en contacto térmico entre sí. ¿Cómo determinamos si estarían en equilibrio térmico si pudiéramos ponerlos en contacto? Supongamos también que tenemos un tercer objeto, llamado C, que se puede colocar en contacto térmico con A, y que A y C están en equilibrio térmico. Si C se pone ahora en contacto con B y si B y C también están en equilibrio térmico, entonces podemos concluir que A y B están en equilibrio térmico. Esto se resume mediante la declaración de la **ley cero de la termodinámica**.

ley cero de la termodinámica ➤

Si los objetos A y B están en equilibrio térmico con el objeto C, en tal caso A y B están en equilibrio térmico entre sí.

Aunque esta declaración puede parecer tan obvia que no vale la pena elevarla al nivel de ley, desempeña una función muy fundamental en la termodinámica, porque es la base para la definición de la temperatura. Dos objetos en equilibrio térmico tienen la misma temperatura. Por otra parte, si dos objetos no están en equilibrio térmico, deben tener temperaturas diferentes. La ley cero fue desarrollada más tarde en la historia de la termodinámica, pero se le llama cero porque es más básica que las otras leyes de la termodinámica.

## Calor, temperatura y energía interna

El calor y la temperatura no son lo mismo. El calor es una energía, mientras que la temperatura es una propiedad macroscópica de un objeto. Dos objetos pueden

## JOULE | Un genio inmoderado

James Prescott Joule (1818-1889) fue el segundo hijo de una familia de acaudalados cerveceros en el pueblo de Salford, cerca de Manchester, Inglaterra, una región industrial. Cuando era joven, Joule fue alumno de John Dalton, un destacado y anciano químico, y decidió temprano en su vida seguir la ciencia de la física como un pasatiempo serio.

En la actualidad, Joule es recordado por sus experimentos y teorías sobre el trabajo, la energía y el calor. Michael Faraday fue una inicial e importante fuente de inspiración, y Joule efectuó experimentos sobre el calentamiento en alambres conductores; principalmente hechos de cobre o platino. Sus fuentes de energía fueron pilas voltaicas y el dínamo. Su trabajo inicial le ganó una reputación de pionero en el diseño y la eficiencia de las baterías. Sus opiniones acerca de las equivalencias del calor y el trabajo provenían de estos experimentos electroquímicos iniciales.

Manchester era una ciudad de motores de vapor, de modo que era natural que Joule y sus amigos en el grupo científico y de ingeniería del lugar discutieran las teorías del calor y los medios para mejorar el desempeño de un motor. Su propia obra condujo de manera general al concepto de eficiencia térmica, pero contribuyó poco a la tecnología del vapor, porque consideraba que los ingenieros estaban mejor capacitados para los mejoramientos técnicos. El trabajo de los físicos era ampliar el poder de la teoría.

Joule sobresalió en la medición de precisión. Tuvo la suerte de que una empresa de Manchester fabricara calorímetros y termómetros para él. Para 1840, había calibrado las diferencias de temperatura con una precisión de  $0.01^\circ\text{F}$ , y en experimentos posteriores utilizó calibraciones con la mitad de esta magnitud. Muchos de sus compañeros en esa época subestimaron la importancia de las



James Prescott Joule

© The Bridgeman Art Library

mediciones de precisión. La designación de Joule para su primera comisión británica importante sobre normas científicas validó su esfuerzo.

Cuando evolucionó su comprensión de los problemas, Joule reconoció y midió la equivalencia entre el trabajo mecánico y el calor de varias maneras. Una de las más sorprendentes fue la medición de precisión del aumento en la temperatura del agua cuando caía de una cascada a un estanque. Sus primeras observaciones fueron en Francia, pero especuló acerca de las cataratas del Niágara, que no había visitado, y predijo con exactitud el aumento de su temperatura.

En una reunión durante la cual Joule presentó un documento que casi nadie entre los asistentes comprendió por completo, conoció a un importante colaborador, William Thomson, conocido después como Lord Kelvin. Las habilidades matemáticas de Kelvin combinadas con las mediciones cuidadosas de Joule solidificaron la comprensión de la primera y la segunda leyes de la termodinámica. Entre otras contribuciones, su trabajo presagió el ascenso de la refrigeración mecánica en la segunda mitad del siglo XIX. Los conceptos actuales de energía y el uso de mediciones de precisión le deben mucho al sosegado y modesto trabajo efectuado por James Prescott Joule.

—C. Pierce Mullen, historiador y autor

Fuentes: Mary B Hesse, *Forces and Fields: The Concept of Action at a Distance in the History of Physics* (Nueva York: Philosophical Library, 1962); Henry John Steffens, *James Prescott Joule and the Concept of Energy* (Nueva York: Science History Publications, 1979).

estar a la misma temperatura (la misma energía cinética atómica promedio) y no obstante transferir cantidades muy diferentes de energía a un tercer objeto. Por ejemplo, una alberca de agua y una taza de agua a la misma temperatura funden cantidades muy diferentes de hielo.

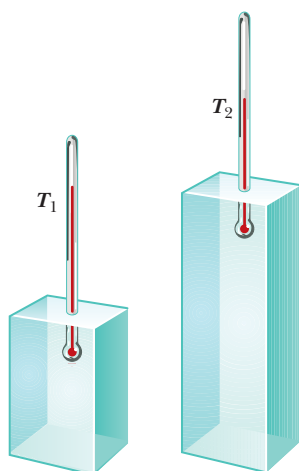
### FÍSICA | HÁGALO USTED MISMO

Mezcle cantidades iguales de agua a diferentes temperaturas para ver si la temperatura de equilibrio está a la mitad entre las temperaturas caliente y fría. Los vasos de espuma de poliestireno aíslan muy bien el sistema del ambiente. Las pérdidas ante el ambiente se minimizan todavía más si una temperatura está por encima de la temperatura ambiente y la otra debajo. A continuación pruebe con cantidades desiguales de agua y prediga la temperatura final.

Cuando consideramos la energía microscópica total de un objeto —como las energías cinéticas de rotación y traslación en los enlaces moleculares— hablamos de la **energía interna** del objeto. Existen dos maneras para aumentar la energía interna de un sistema. Una es calentarlo; la otra es hacer un trabajo sobre el sistema. La ley de la conservación de la energía nos dice que el cambio total en la energía interna del sistema es igual al cambio debido al calor agregado al sistema, más el debido al trabajo realizado sobre el sistema. Ésta se llama la **primera ley de la termodinámica** y en realidad es sólo un replanteamiento de la ley de la conservación de la energía.

primera ley de la termodinámica ➤

El incremento en la energía interna de un sistema es igual al calor agregado más el trabajo realizado sobre el sistema.



**Figura 9-2** La incorporación de cantidades diferentes de calor a un material produce cambios de temperatura distintos.

Esta ley arroja más luz sobre la naturaleza de la energía interna. Supongamos que si se agregan 10 calorías de calor a una muestra de gas, la temperatura aumenta  $2^{\circ}\text{C}$ . Si agregamos las mismas 10 calorías a una muestra del mismo gas que tiene el doble de masa, descubrimos que la temperatura aumenta sólo  $1^{\circ}\text{C}$  (figura 9-2). La incorporación de la misma cantidad de calor no produce el mismo aumento en la temperatura. Esto tiene sentido porque la muestra más grande de gas tiene el doble de partículas y, por lo tanto, cada partícula recibe sólo la mitad de la energía, en promedio. La energía cinética promedio, y por lo tanto la temperatura, deben aumentar la mitad. Un incremento en la temperatura es una indicación de que ha aumentado la energía interna del gas, pero debe conocerse la masa para decir cuánto aumenta.

## Cero absoluto

La temperatura de un sistema se puede reducir al retirar una parte de su energía interna. Debido a que existe un límite sobre cuánta energía interna se puede eliminar, es razonable suponer que existe una temperatura más baja posible. Esta temperatura se conoce como **cero absoluto** y tiene un valor de  $-273^{\circ}\text{C}$ , la misma temperatura que se utiliza para definir el cero de la escala Kelvin.

La existencia de un cero absoluto planteó el desafío de alcanzarlo de manera experimental. La factibilidad de hacerlo se discutió mucho durante las primeras tres décadas del siglo XX, y al final se concluyó que era imposible. Esta idea se formalizó en la declaración de la tercera ley de la termodinámica.

tercera ley de la termodinámica ➤

El cero absoluto se puede aproximar de manera experimental, pero nunca puede alcanzarse.

Parece que no hay una restricción acerca de cuán cerca pueden llegar los experimentadores, sólo que no puede alcanzarse. Los sistemas pequeños en laboratorios de temperaturas bajas han alcanzado temperaturas a una distancia menor de una milmillonésima de grado del cero absoluto.

Una sustancia al cero absoluto tiene la energía interna más baja posible. Al principio, se pensaba que, al cero absoluto, cesarían todos los movimientos atómicos. El desarrollo de la mecánica cuántica demostró que todo el movimiento no cesa; los átomos realizan una especie de parpadeo con el mínimo movimiento posible. En este estado, los átomos se atestan muy cerca uno de otro. Sus fuerzas de enlace mutuas los organizan en un bloque sólido.

## Calor específico



Suponga que tenemos la misma cantidad de moléculas de dos gases diferentes y que cada gas al principio está a la misma temperatura. Si agregamos la misma cantidad de calor a cada gas, encontramos que la temperatura no aumenta la misma cantidad. Aunque los gases experimentan el mismo cambio en sus energías internas, sus moléculas no experimentan los mismos cambios en sus energías cinéticas de traslación promedio. Parece que se pierde una parte del calor. En realidad, el calor se transforma a otras formas de energía. Si las moléculas del gas tienen más de un átomo, una parte de la energía interna se transforma en energía cinética de rotación de las moléculas y una parte puede ir al movimiento migratorio de los átomos (figura 9-3). Sólo una fracción pequeña del aumento en la energía interna para casi todos los gases reales se ocupa para aumentar la energía cinética promedio que aparece como un incremento en la temperatura.



La cantidad de calor que se requiere para aumentar la temperatura de un objeto  $1^{\circ}\text{C}$  se conoce como la **capacidad calorífica** del objeto. La capacidad calorífica depende de la cantidad y el tipo de material utilizado para construir el objeto. Un objeto con el doble de masa tendrá el doble de capacidad calorífica, siempre y cuando ambos objetos estén hechos del mismo material.

Podemos obtener una propiedad intrínseca del material que no dependa del tamaño o la forma del objeto al dividir la capacidad calorífica entre la masa del objeto. Esta propiedad se conoce como el **calor específico** y es la cantidad de calor requerida para aumentar  $1^{\circ}\text{C}$  la temperatura de 1 gramo del material.

Por definición, el calor específico del agua es numéricamente 1; es decir, 1 cal aumenta  $1^{\circ}\text{C}$  la temperatura de 1 gramo de agua. El calor específico para un material determinado en un estado particular depende ligeramente de la temperatura, pero suele suponerse que es constante. Los valores específicos de algunos materiales comunes se presentan en la tabla 9-1. Observe que las unidades del SI para el calor específico son joules por kilogramo-kelvin. Éstos se obtienen al multiplicar los valores en calorías por gramo-grado Celsius por 4186. Observe también que el valor para el agua es bastante alto comparado con casi todos los otros materiales.

**Pregunta** ¿Cuál es el aumento en la temperatura cuando se agregan 20 calorías a 10 gramos de hielo a  $-10^{\circ}\text{C}$ ?

**Respuesta** Esto es lo mismo que incorporar 2 calorías a cada gramo. Debido a que se requiere  $\frac{1}{2}$  caloría para aumentar  $1^{\circ}\text{C}$  la temperatura de 1 gramo de hielo, las 2 calorías aumentarán su temperatura  $4^{\circ}\text{C}$ .

**Tabla 9-1**

**Calores específicos para diversos materiales**

Material	Calor específico	
	(cal/g · $^{\circ}\text{C}$ )	(J/kg · K)
<b>Sólidos</b>		
Aluminio	0.215	900
Cobre	0.092	385
Diamante	0.124	519
Oro	0.031	130
Hielo	0.50	2090
Plata	0.057	239
<b>Líquidos</b>		
Etanol	0.75	3140
Mercurio	0.033	138
Agua	1.00	4186
<b>Gases</b>		
Aire	0.24	1000
Helio	1.24	5190
Nitrógeno	0.25	1040
Oxígeno	0.22	910

Cuando ponemos dos materiales diferentes en contacto térmico entre sí, alcanzan un equilibrio térmico, pero normalmente no experimentan los mismos cambios en la temperatura porque suelen tener capacidades caloríficas distintas. Sin embargo, la conservación de la energía nos dice que el calor que pierde el objeto más caliente es igual al calor que adquiere el objeto más frío. (Suponemos que no se pierde energía ante el ambiente.)

Los calores específicos de los materiales en la superficie terrestre para los extremos de temperatura se rezagan tras los cambios estacionales. El primer día del verano en el hemisferio norte suele ocurrir el 21 de junio. En este día, el suelo recibe la mayor cantidad de radiación solar porque es el día más largo del año y el Sol se acerca más a la vertical. No obstante esto, los días más cálidos del verano suele ocurrir varias semanas después. Se requiere tiempo para que el suelo se caliente porque necesita mucha energía para aumentar su temperatura cada grado.

## Cambio de estado



Proseguimos nuestra investigación de la energía interna al retirar de manera continua energía de un gas y observar su temperatura. Si mantenemos constantes la



**Figura 9-3** Tres formas de energía interna para una molécula diatómica.



## SOLUCIÓN | Calor específico

El calor específico  $c$  se obtienen al dividir el calor  $Q$  agregado al material entre el producto de la masa  $m$  y el cambio resultante en la temperatura  $\Delta T$ :

$$c = \frac{Q}{m\Delta T}$$

Por ejemplo, si se requieren 11 calorías para elevar  $15^\circ\text{C}$  la temperatura de una moneda de cobre de 8 gramos, podemos calcular el calor específico del cobre:

$$c = \frac{Q}{m\Delta T} = \frac{11 \text{ cal}}{(8 \text{ g})(15^\circ\text{C})} = 0.092 \text{ cal/g} \cdot ^\circ\text{C}$$

Observe que esto coincide con la información de la tabla 9-1.

Podemos reorganizar nuestra definición del calor específico con el propósito de obtener una expresión para el calor requerido para cambiar una cantidad determinada la temperatura de un objeto. Por ejemplo, suponga que tiene una taza de agua a temperatura ambiente que quiere hervir. ¿Cuánto calor requerirá esto? Supongamos que la taza contiene  $\frac{1}{4}$  L de agua a  $20^\circ\text{C}$  y que podemos ignorar el calentamiento de la taza misma. La masa del agua son 250 g, y el punto de ebullición del agua son  $100^\circ\text{C}$  a 1 atm. Por lo tanto, el cambio de temperatura son  $80^\circ\text{C}$ , y tenemos

$$Q = cm\Delta T = \left(1 \frac{\text{cal}}{\text{g} \cdot ^\circ\text{C}}\right) (250 \text{ g})(80^\circ\text{C}) = 20\,000 \text{ cal} = 20 \text{ kcal}$$

Las 20 kcal de energía deben suministrarse mediante una estufa o un horno de microondas.

## Razonamiento defectuoso



Un manual de laboratorio pide a los estudiantes que mezclen 400 gramos de etanol caliente a  $60^\circ\text{C}$  con 300 gramos de agua a la temperatura ambiente a  $20^\circ\text{C}$ . Antes de efectuar este experimento, dos estudiantes hacen predicciones de la temperatura final de la mezcla.

**Dylan:** “La temperatura final será *más alta* que  $40^\circ\text{C}$ . Si las masas fueran iguales, la temperatura final estaría entre 20 y  $60^\circ\text{C}$ , pero hay más etanol que agua.”

**Jessica:** “No, la temperatura final de la mezcla será *más baja* que  $40^\circ\text{C}$ . El agua tiene un calor específico más alto, de modo que el agua tendrá un cambio más pequeño en la temperatura.”

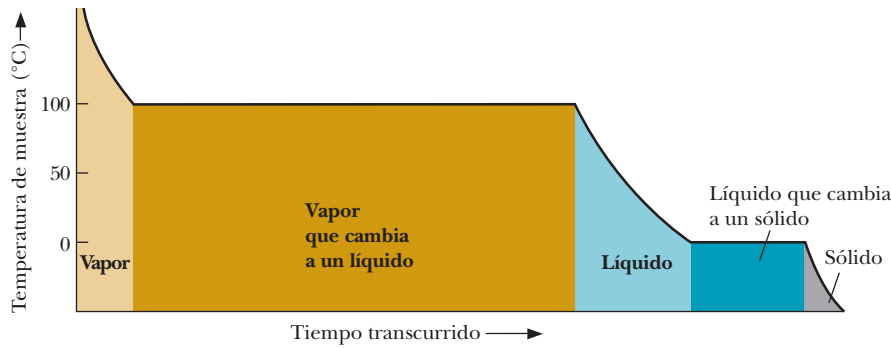
Los dos estudiantes están equivocados. **Encuentre el defecto en su razonamiento.**

**Respuesta** Dylan se concentra en las masas relativas, mientras que Jessica se concentra en los calores específicos. Ambos factores desempeñan una función para determinar la capacidad calorífica de un objeto. La temperatura de equilibrio se acercará más a la temperatura inicial del fluido que tenga la capacidad calorífica más alta. Las capacidades caloríficas  $C$  del etanol y el agua son

$$C_{\text{etanol}} = c_{\text{etanol}} m_{\text{etanol}} = \left(0.75 \frac{\text{cal}}{\text{g} \cdot ^\circ\text{C}}\right) (400 \text{ g}) = 300 \frac{\text{cal}}{^\circ\text{C}}$$

$$C_{\text{agua}} = c_{\text{agua}} m_{\text{agua}} = \left(1 \frac{\text{cal}}{\text{g} \cdot ^\circ\text{C}}\right) (300 \text{ g}) = 300 \frac{\text{cal}}{^\circ\text{C}}$$

En este ejemplo, ambos fluidos tienen la misma capacidad calorífica, de modo que la temperatura de equilibrio final será  $40^\circ\text{C}$ , la mitad entre las dos temperaturas iniciales.



**Figura 9-4** Un gráfico de la temperatura del agua en contra del tiempo mientras se elimina energía térmica del agua. Observe que la temperatura permanece constante cuando se condensa el vapor a agua líquida y cuando el agua líquida se congela para formar hielo.

presión, el volumen y la temperatura del gas, disminuyen de manera bastante uniforme hasta que el gas alcanza cierta temperatura. En esta temperatura, ocurre una rápida disminución en el volumen y *ningún* cambio en la temperatura. Comienzan a formarse gotas de líquido en el recipiente. Conforme seguimos retirando energía del gas, se forma cada vez más líquido, pero la temperatura no cambia. Cuando todo el gas se ha condensado hacia un líquido, la temperatura vuelve a disminuir (figura 9-4). El cambio del estado gaseoso al estado líquido (o de líquido a sólido), o viceversa, se conoce como un **cambio de estado**.

Mientras el gas se condensaba hacia un líquido, salía energía de manera continua del sistema, pero la temperatura permaneció igual. Casi toda esta energía provino de la disminución en la energía eléctrica potencial entre las moléculas cuando se acercaban para formar el líquido. Esta situación es similar a la liberación de energía gravitacional potencial cuando una pelota cae hacia la superficie terrestre. La energía que debe liberarse o adquirirse por unidad de masa del material se conoce como **calor latente**. Los valores del calor latente para la fusión y la vaporización se presentan en la tabla 9-2.

### FÍSICA | HÁGALO USTED MISMO

Un rumor popular dice que el agua caliente se congela más rápido que el agua fría. Investigue esto al colocar cantidades iguales de agua caliente y fría en recipientes idénticos en su refrigerador o en el exterior en una noche fría. ¿Existe algo de cierto en este rumor popular? ¿Su respuesta depende del tipo de recipiente o qué tan caliente y fría está el agua?

Ocurre el mismo proceso cuando calienta un líquido. Si coloca una cacerola con agua en la estufa, la temperatura aumenta hasta que el agua comienza a hervir. A continuación, la temperatura permanece constante mientras hierve el agua. No importa si el agua hierve rápido o lento. (Debido a que la velocidad a la que se cocinan los alimentos sólo depende de la temperatura del agua, puede ahorrar energía al bajar la llama lo más posible mientras hierve sus alimentos.) Durante el cambio

**Tabla 9-2** | Puntos de fusión, de ebullición, y calores latentes para diversos materiales

Material	Punto de fusión (°C)	Calor latente (Fusión)		Punto de ebullición (°C)	Calor latente (Vaporización)	
		(kJ/kg)	(cal/g)		(kJ/kg)	(cal/g)
Nitrógeno	-210	25.7	6.14	-196	199	47.5
Oxígeno	-218	13.8	3.3	-183	213	50.9
Agua	0	334	79.8	100	2257	539
Aluminio	660	396	94.6	2467	10 900	2600
Oro	1064	63	15	2807	1710	409



La fusión de la nieve y el hielo en el Parque Nacional Glaciar es un proceso lento debido al calor latente requerido para cambiar el hielo a agua líquida.

de estado, la energía adicional se utiliza para romper los enlaces entre las moléculas de agua y no para aumentar la energía cinética promedio de las moléculas. Cada gramo de agua requiere cierta cantidad de energía para cambiar su forma líquida a vapor sin alterar su temperatura. De hecho, ésta es la misma cantidad de energía que debe liberarse para convertirse el vapor de vuelta a agua líquida. Además, la temperatura a la que se condensa el vapor hacia agua es igual que el punto de ebullición. Los puntos de fusión y de ebullición para algunas sustancias comunes se presentan en la tabla 9-2.

**Pregunta** En la temperatura de ebullición, ¿qué determina si el líquido se convierte en gas o el gas se convierte en líquido?

**Respuesta** Si se proporciona calor, el líquido hervirá para producir gas adicional. Sin embargo, si el calor se retira, una parte del gas se condensará para formar líquido adicional.

Ocurre un cambio de estado similar cuando se funde la nieve. La nieve no se vuelve de repente en agua cuando la temperatura aumenta a  $0^{\circ}\text{C}$  ( $32^{\circ}\text{F}$ ). Más bien, a esa temperatura, la nieve sigue absorbiendo la energía de sus alrededores, y mientras lo hace se transforma lentamente en agua. Por cierto, tenemos suerte que se comporte de este modo; de lo contrario, tendríamos inmensas inundaciones en el momento en que la temperatura se elevara por encima del punto de congelación. El calor latente requerido para fundir el hielo explica por qué el hielo puede mantener una bebida cerca de la congelación hasta que se derrite lo último del hielo.

En las noches cuando se predice que la temperatura bajará por debajo del punto de congelación, los propietarios de huertos frutales en California y Florida encienden los rociadores para evitar que se congelen las frutas. Cuando se congela el agua, se emite calor que mantiene la temperatura de la fruta a  $0^{\circ}\text{C}$ , una temperatura por encima de donde se congela la fruta. Una vez que el agua se congela por completo, la fruta todavía está protegida porque el hielo no conduce muy bien el calor. El hielo sirve como un “suéter” para la fruta. Sin embargo, si la temperatura del aire desciende demasiado, la fruta se estropeará.

### FÍSICA | HÁGALO USTED MISMO

Determine el número de calorías necesarias para fundir 1 gramo de hielo. Ponga un poco de hielo en un vaso de espuma de poliestireno después que haya medido la masa del hielo, la masa del agua y la temperatura del agua. Para minimizar la pérdida de energía térmica en el ambiente, ponga encima un pedazo de espuma de poliestireno (u otro vaso) mientras se derrite el hielo. ¿La pérdida de energía térmica en el ambiente provoca que el valor que usted obtiene sea muy alto o muy bajo?



La energía térmica se transforma sobre el hierro para marcar ganado mediante conducción, porque el hierro está más caliente que la manija.

## Conducción

### ✓ MATEMÁTICAS

La energía térmica se traslada de un lugar a otro a través de tres mecanismos: conducción, convección y radiación. Cada uno de éstos es importante en ciertas circunstancias y puede ser ignorado en otras.

Si existen diferencias de temperatura dentro de un solo objeto aislado, como un hierro para marcar ganado sostenido sobre una fogata, la energía térmica fluirá hasta que se obtenga un equilibrio térmico. La **conducción** ocurre mediante colisiones entre las partículas del material. Las moléculas y los electrones en el extremo caliente del hierro para marcar chocan con sus vecinas, y transfieren una parte de su energía cinética, en promedio. Esta mayor energía cinética avanza sobre la varilla mediante colisiones, hasta que el extremo que está en su mano se calienta.

La velocidad de conducción de la energía varía de una sustancia a otra. Los sólidos, con sus partículas estrechamente unidas, tienden a conducir mejor la energía





© Bambi L. Dingman/Dmytro Tolokonov/Dreamstime

**Figura 9-5** El extremo izquierdo de esta vasija de cerámica está congelado, mientras el extremo derecho está muy caliente. Esto ocurre porque la cerámica es un conductor de energía térmica muy deficiente.

térmica que los líquidos y los gases. La movilidad de los electrones dentro de los materiales también afecta la conductividad térmica. Los metales como el cobre y la plata son buenos **conductores** térmicos, al igual que buenos conductores eléctricos. Por el contrario, los aislantes eléctricos como el vidrio y la cerámica también son buenos **aislantes** térmicos. Un soplador de vidrio puede sostener una varilla de vidrio en una flama durante mucho tiempo sin quemarse. El tazón de cerámica de la figura 9-5 tiene regiones a temperaturas drásticamente diferentes.

Las diferencias en la conductividad de los materiales explican por qué las bancas de aluminio y de madera en un estadio de fútbol no se sienten iguales en un día frío. Antes que usted se siente en cualquiera de estas bancas, están a la misma temperatura. Cuando se sienta, una parte de la energía térmica de su cuerpo fluye hacia la banca. Debido a que la banca de madera no conduce muy bien el calor, el lugar donde se sienta se calienta y usted se siente más cómodo. Por otra parte, la banca de aluminio conduce el calor de manera continua lejos de su cuerpo, lo cual hace que su asiento se sienta frío.

### FÍSICA | HÁGALO USTED MISMO

Seleccione algunos utensilios de cocina hechos de diferentes materiales y sosténgalos junto a su mejilla. Debido a que todos provienen de la cocina, deben estar a la misma temperatura. ¿Qué siente usted? ¿Puede clasificar los materiales de acuerdo con sus conductividades?

La velocidad a la que se conduce la energía térmica a través de una losa de material depende de muchos parámetros físicos, además del tipo de material. Puede suponer correctamente que depende del área y el grosor del material. Un área más grande permite que pase más energía térmica, y un mayor grosor permite que pase menos. La experimentación nos indica que también importa la diferencia en las temperaturas de los dos lados de la losa; entre más grande es la diferencia, mayor es el flujo. La tabla 9-3 contiene la conductividad térmica de diversos materiales comunes.

En nuestras vidas cotidianas, nos interesa más reducir la transferencia de energía térmica que aumentarla. Utilizamos ropas para conservar el calor de nuestro cuerpo, y aislamos nuestras casas para reducir las cuentas de calefacción y de aire acondicionado. La figura 9-6 presenta regiones de un tejado después de una tormenta de nieve. Existen parches no derretidos donde el aislamiento es mejor o, en el caso de un pórtico o una cochera sin calefacción, donde hay poca o ninguna diferencia de temperatura. La tabla 9-3 nos permite comparar la pérdida de calor a través de losas de distintos materiales del mismo tamaño y grosor para la misma diferencia en las temperaturas.

**Tabla 9-3** |

Las conductividades térmicas de diversos materiales

Material	Conductividad (W/m · °C)
<b>Sólidos</b>	
Plata	428
Cobre	401
Aluminio	235
Acero inoxidable	14
<b>Materiales de construcción</b>	
Espuma de poliuretano	0.024
Fibra de vidrio	0.048
Madera	0.08
Vidrio para ventanas	0.8
Concreto	1.1
<b>Gases</b>	
Aire (inmóvil)	0.026
Helio	0.15



**Figura 9-6** Los patrones de fusión de la nieve revelan diferencias en la conducción térmica. Por ejemplo, la antigua cochera se ha convertido en un espacio para vivir, pero parece que no se ha aislado.

© A. A. Bartlett, Universidad de Colorado, Boulder.



Un examen de la tabla 9-3 revela que el aire estático es un muy buen aislante. Esta propiedad aislante del aire significa que las sustancias porosas con muchos espacios de aire diminutos son buenos aislantes, y eso explica por qué la pluma de ganso utilizada en las bolsas para dormir lo mantiene tan caliente. También explica cómo la ropa interior larga de malla lo mantiene caliente. El aire atrapado en los orificios evita que el calor de su cuerpo se emita hacia afuera.

La nieve contiene mucho espacio de aire entre sus copos, lo que significa que la nieve es un buen aislante térmico. Los montañistas suelen cavar cuevas en la nieve para escapar de las inclemencias del clima. Asimismo, un terreno cubierto de nieve no se congela a tanta profundidad como el suelo descubierto.

---

**Pregunta** ¿Por qué las personas que pasan tiempo en exteriores en clima frío utilizan muchas capas de ropa?

---

**Respuesta** Además de la flexibilidad de agregar y quitar capas para obtener el aislamiento requerido, los espacios de aire entre las capas contribuyen al aislamiento general.

---

## Convección

La energía térmica también se transfiere en los fluidos mediante **convección**. En la convección, el movimiento del fluido transporta la energía. Este movimiento puede forzarse, como en los sistemas de calefacción o el sistema de enfriamiento de un automóvil, o puede ocurrir debido a los cambios que ocurren en la densidad del fluido cuando se calienta o enfría. Cuando se calienta el gas cerca de la flama de una vela, se vuelve menos denso y se eleva debido a la fuerza de flotación (capítulo 8).

La convección en la atmósfera de la Tierra desempeña una función fundamental en el clima mundial, al igual que nuestro clima cotidiano. Surgen corrientes de convección del calentamiento desigual de la superficie terrestre. Los pilotos de parapente y de ala delta, y las aves de presa (como los halcones y las águilas) emplean corrientes de convección, llamadas térmicas, con el fin de obtener la elevación que necesitan para mantenerse en lo alto.

Los vientos locales cerca de un cuerpo de agua grande pueden ser provocados por las diferencias de temperatura entre el agua y el terreno. El calor específico del agua es mucho más grande que el de la roca y el suelo. (Las corrientes de convección en el agua también moderan los cambios en la temperatura del agua.) Durante la mañana, la tierra se calienta más rápido que el agua. La tierra más caliente calienta el aire sobre ella, y provoca que el aire ascienda. El resultado es una agradable brisa de aire más fresco proveniente del agua (figura 9-7[a]). Durante la noche, la tierra se enfría más rápido, lo cual invierte el ciclo de convección (figura 9-7[b]).

© Royalty-Free/Corbis

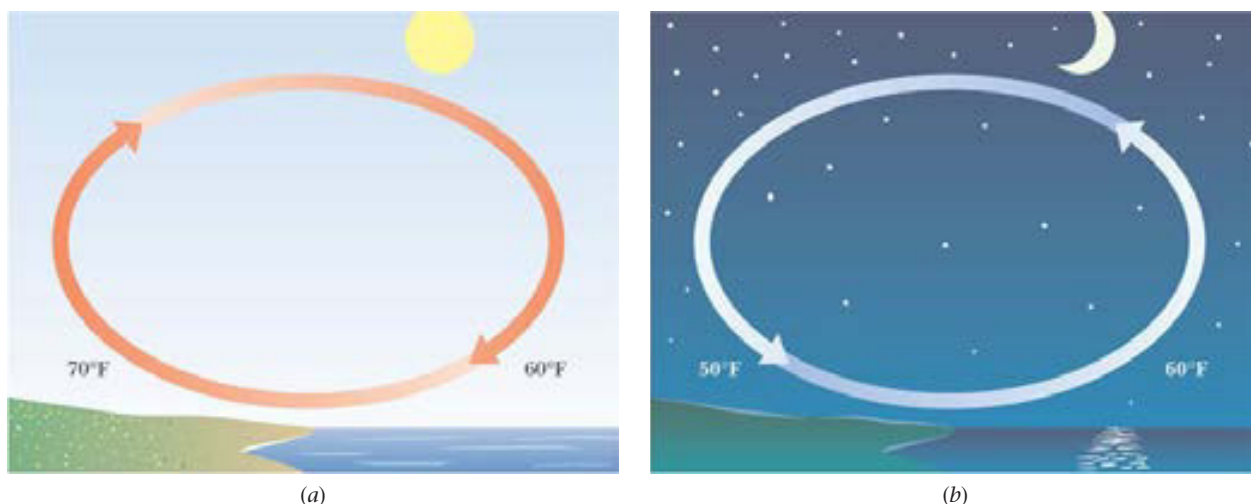


Los pilotos de parapente buscan las corrientes térmicas para adquirir altura.

---

**Pregunta** ¿Qué función desempeña la convección para conseguir que hierva una cacerola con agua?

---



**Figura 9-7** La diferencia en la temperatura entre la tierra y el agua hace que sopla la brisa (a) en tierra durante la mañana, y (b) mar adentro durante la noche.

**Respuesta** Cuando la flama o el elemento calefactor calienta el agua cerca de la parte inferior de la cacerola, se vuelve menos densa y asciende. Esta circulación hace que toda el agua se caliente al mismo tiempo.

## Radiación

El tercer mecanismo para la transferencia de energía térmica se relaciona con las ondas electromagnéticas. Como veremos en el capítulo 12, estas ondas pueden viajar por un vacío y, por lo tanto, la **radiación** todavía es eficaz en situaciones en donde fracasan los procesos de conducción y convección. La radiación electromagnética viaja por el espacio y se vuelve a convertir en energía térmica cuando choca con otros objetos. Casi todo el calor que usted siente de un fuego acogedor se transfiere mediante radiación, en especial si el fuego está detrás de un vidrio o en una estufa.

Todos los objetos emiten radiación. Aunque la radiación de los objetos a temperatura ambiente no es visible para el ojo humano, puede apreciarse con anteojos de sombra especiales o registrarse en película sensible al infrarrojo. Cuando se añaden colores de manera artificial, podemos diferenciar las temperaturas de los objetos, como se aprecia en la figura 9-8.

Cuando aumenta la temperatura del objeto, la radiación se vuelve cada vez más visible. Los objetos como el serpentín de calentamiento en la estufa de una cocina brillan con un color rojo-anaranjado. Betelgeuse, la estrella roja que marca el hombro derecho de la constelación de Orión, tiene una temperatura superficial de aproximadamente 3000 K. Cuando un objeto se vuelve más caliente, el color cambia a amarillo y luego a blanco. Nuestro Sol aparece blanco (sobre la atmósfera de la Tierra) con una temperatura de 5800 K. Las estrellas más calientes aparecen en azul y tienen temperaturas que superan los 30 000 K.

La radiación que la Tierra recibe del Sol es la normal de un objeto a 5800 K. Si la Tierra absorbiera toda esta energía, cada mes se volvería más caliente, hasta que no existiera la vida tal como la conocemos. Sin embargo, la Tierra también irradia. Su temperatura aumenta hasta que irradia tanta energía el espacio como la que recibe; alcanza un equilibrio.

Un fenómeno conocido como *efecto invernadero* puede tener un efecto importante sobre la condición de equilibrio. La luz visible pasa fácilmente por las ventanas de un invernadero o automóvil, y calienta el interior. No obstante, la radiación infrarroja emitida por el interior no atraviesa fácilmente el vidrio y queda atrapada dentro. Sólo cuando la temperatura alcanza un valor alto se establece un equilibrio. Ésta es una razón por la que nos recomiendan nunca dejar niños o mascotas en un automóvil con las ventanas cerradas en un día caluroso.



**Figura 9-8** Esta fotografía infrarroja de una casa muestra las diferentes temperaturas de sus partes.

Ocurre algo similar con la Tierra. La atmósfera es transparente para la luz visible, pero el vapor de agua y el dióxido de carbono en la atmósfera tienden a evitar que escape la radiación infrarroja, lo cual hace que aumente la temperatura de la Tierra. Las temperaturas superficiales altas en Venus se deben al efecto invernadero de su densa atmósfera. Se teme que los incrementos en la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera de la Tierra (debido a cosas como la quema de combustibles fósiles) provocarán un calentamiento global que a su vez generará cambios no deseados en el clima terrestre. Algunas alteraciones en el clima pueden modificar los tipos de cosechas que se cultivarán y derretir las capas de hielo polares, lo cual inundaría las ciudades costeras.

## Factor de congelación

El meteorólogo de la televisión anuncia las temperaturas para el día y luego agrega que se va a sentir más frío a causa del viento. Si el aire está a cierta temperatura, ¿por qué importa si sopla del viento?

Su cuerpo produce constantemente calor que debe liberarse en el ambiente para evitar que su cuerpo se sobrecaliente. El principal modo en que su cuerpo elimina el exceso de calor es a través de la evaporación. Por cada litro (alrededor de 1 cuarto de galón) de agua que evapora, se absorben cerca de 600 kilocalorías de calor de su cuerpo. Si bien casi todos asociamos correctamente este mecanismo con sudar, un sorprendente 25% del calor perdido por evaporación por una persona en reposo se debe a la evaporación del agua del interior de nuestros pulmones en el aire que exhalamos. Una actividad vigorosa puede producir sudoración en una medida que excede los 2 litros por hora, y consumir 1200 kilocalorías por hora, una velocidad decenas de veces más grande que para una persona en reposo.

Otra forma de pérdida de calor se debe a la convección del aire al alejarse del cuerpo. Incluso sin viento, el aire abandona su piel en un día frío porque su densidad cambia conforme su cuerpo calienta el aire. Una tercera forma de pérdida de calor es por radiación. Si su cuerpo está más caliente que los objetos circundantes, como las paredes de una habitación, su cuerpo irradia energía a las paredes. Por eso usted siente frío algunas mañanas, aunque el aire de la habitación se haya calentado a la temperatura ambiente normal. Las paredes tardan algún tiempo en calentarse, y usted seguirá irradiándolas hasta que se calienten.

El viento cercano a su cuerpo altera mucho la eficacia de estas transferencias térmicas. En el aire inmóvil, la capa de aire junto a su piel se calienta y humedece, lo cual reduce una pérdida adicional de calor en esta capa de aire. Sin embargo, si hay viento, éste acerca a su piel un aire más frío y más seco. El calentamiento y humectación adicional de este aire nuevo requieren calor adicional de su cuerpo.

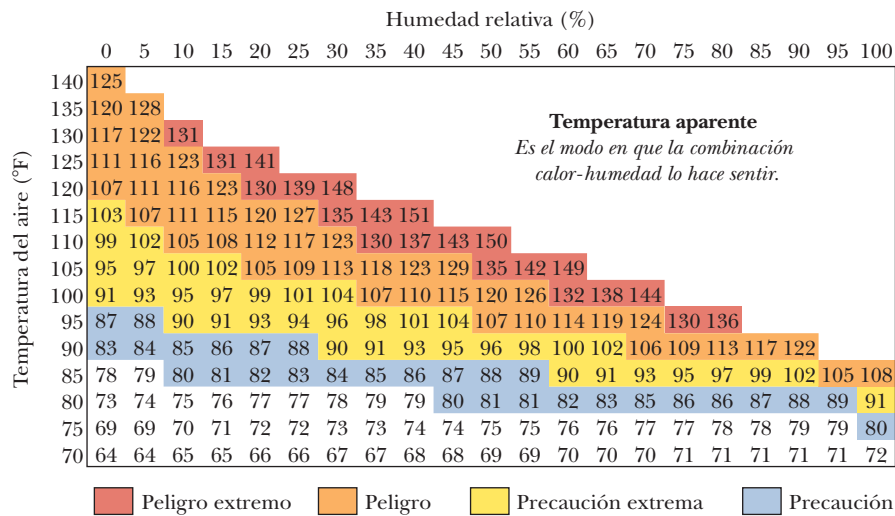
A mediados de la década de 1940, se creó con nuevo indicador: el *factor de congelación*, para expresar los efectos del enfriamiento para diversas temperaturas ambiente y las velocidades del viento en términos de una temperatura “equivalente” sin viento. Podemos emplear los datos presentados en la tabla 9-4 para determinar la temperatura del factor de congelación para una lectura del termómetro de 25°F en un día en que el viento sopla a 40 mph. Busque en la parte superior de la tabla hasta que localice 25°F y luego baje por esta columna hasta la fila que dice 40 mph en el lado izquierdo de la tabla. El asiento en la intersección de esta fila y esta columna es la temperatura equivalente. Por lo tanto, el efecto de enfriamiento equivale a una temperatura de 6°F en un día tranquilo.

Igual que el viento puede aumentar la velocidad con la que el calor abandona el cuerpo humano, la humedad relativa frena la evaporación del sudor, lo cual reduce la velocidad. El *índice de calor* de la tabla 9-5 combina los efectos de la temperatura y la humedad relativa para producir una temperatura aparente, similar al factor de congelación. Es muy probable padecer fiebre térmica por la exposición continua a índices de calor de 130°F o más. Son probables insolación, calambres por calor y agotamiento térmico por índices de calor entre 105°F y 130°F y son posibles con valores entre 90 a 105°F. Debe señalarse que estos valores se basan en condiciones de cielo nublado y viento ligero. La exposición completa al Sol aumenta los valores del índice de calor hasta 15°F.

**Tabla 9-4** | Factor de congelación

Tran- quilo		Temperatura (°F)																	
		40	35	30	25	20	15	10	5	0	-5	-10	-15	-20	-25	-30	-35	-40	-45
Viento (mph)	5	36	31	25	19	13	7	1	-5	-11	-16	-22	-28	-34	-40	-46	-52	-57	-63
	10	34	27	21	15	9	3	-4	-10	-16	-22	-28	-35	-41	-47	-53	-59	-66	-72
	15	32	25	19	13	6	0	-7	-13	-19	-26	-32	-39	-45	-51	-58	-64	-71	-77
	20	30	24	17	11	4	-2	-9	-15	-22	-29	-35	-42	-48	-55	-61	-68	-74	-81
	25	29	23	16	9	3	-4	-11	-17	-24	-31	-37	-44	-51	-58	-64	-71	-78	-84
	30	28	22	15	8	1	-5	-12	-19	-26	-33	-39	-46	-53	-60	-67	-73	-80	-87
	35	28	21	14	7	0	-7	-14	-21	-27	-34	-41	-48	-55	-62	-69	-76	-82	-89
	40	27	20	13	6	-1	-8	-15	-22	-29	-36	-43	-50	-57	-64	-71	-78	-84	-91
	45	26	19	12	5	-2	-9	-16	-23	-30	-37	-44	-51	-58	-65	-72	-79	-86	-93
	50	26	19	12	4	-3	-10	-17	-24	-31	-38	-45	-52	-60	-67	-74	-81	-88	-95
55	25	18	11	4	-3	-11	-18	-25	-32	-39	-46	-54	-61	-68	-75	-82	-89	-97	
60	25	17	10	3	-4	-11	-19	-26	-33	-40	-48	-55	-62	-69	-76	-84	-91	-98	
		Tiempos de congelación <div>30 minutos</div> <div>10 minutos</div> <div>5 minutos</div>																	

**Tabla 9-5** | Índice de calor



## Razonamiento defectuoso



Susan acaba de terminar de esculpir una figura de cera cuando se da cuenta que el punto de fusión de la cera es de sólo 125°F. El informe climatológico predice que la temperatura alta de mañana será 100°F, con una humedad relativa de 65%, lo que genera una temperatura aparente en el índice de calor de 138°F. **¿Debe Susan guardar su obra maestra en el refrigerador?**

**Respuesta** El índice de calor se aplica sólo a las personas y a otros animales que usan el proceso de sudoración para refrescarse. La estatua de Susan no se fundirá.

## Expansión térmica



Todos los objetos cambian de tamaño cuando alteran su temperatura. Cuando aumenta la temperatura, casi todos los materiales se expanden. Pero no todos los materiales se expanden en la misma medida. Los sólidos, que tienen enlaces más

estrechos, se expanden menos. Todos los gases se expanden en la misma medida y siguen la ecuación del gas ideal. La **expansión térmica** característica de cada material se refleja en un número llamado su *coeficiente de expansión*. El coeficiente de expansión ofrece el cambio fraccional en el tamaño del objeto por cambio de grado en la temperatura.

### ✓ MATEMÁTICAS

## SOLUCIÓN | Expansión térmica

Debido a que el coeficiente de expansión térmica nos dice cuántas unidades de longitud se expande un material cuando la temperatura aumenta  $1^{\circ}\text{C}$ , la expansión para un objeto específico se obtiene mediante

$$\Delta L = \alpha L \Delta T$$

en donde  $\Delta L$  es el cambio en la longitud,  $\alpha$  es el coeficiente de expansión térmica,  $L$  es la longitud original, y  $\Delta T$  es el cambio en la temperatura. Existe una expresión similar para la expansión del volumen de los líquidos.

Como ejemplo, el coeficiente de expansión para el acero es 0.000 011 metro por cada metro de longitud para cada grado Celsius de aumento en la temperatura. Esto significa que un puente de 50 m de longitud se expande 0.000 55 m o 0.55 mm, por cada grado de aumento en la temperatura. Si la temperatura aumenta  $40^{\circ}\text{C}$  de la noche al día, el puente se expande 22 mm (casi 1 pulgada).

También podemos obtener esta respuesta mediante la relación para la expansión térmica:

$$\Delta L = \alpha L \Delta T = \left( \frac{0.000\ 011}{^{\circ}\text{C}} \right) (50\ \text{m})(40^{\circ}\text{C}) = 0.022\ \text{m}$$

La expansión térmica tiene muchas consecuencias. Los ingenieros civiles evitan la posibilidad de que un puente se combe al incluir ranuras de expansión y al montar un extremo del puente sobre rodillos. Las separaciones entre las secciones de concreto en las carreteras y las aceras permiten que el concreto se expanda y se contraiga sin romperse ni combarse. El romántico traqueteo de los viajes en tren se debe a las uniones de expansión entre los rieles.

**Pregunta** ¿Por qué los cables telefónicos están más altos en invierno que en verano?

**Respuesta** Los cables se expanden con las temperaturas más altas en verano y, por lo tanto, cuelgan más abajo.

Utilizamos las diferencias en las expansiones térmicas de diversos materiales para nuestro provecho. Algunos termostatos se construyen con dos tiras metálicas diferentes unidas, igual que en la figura 9-9. Debido a que los metales tienen coeficientes de expansión diferentes, se expanden magnitudes distintas, lo cual hace que la tira de dos metales se combe. La colocación de contactos eléctricos en los lugares adecuados permite que el termostato funcione como un interruptor eléctrico para encender o apagar un horno, un calefactor, o un equipo de aire acondicionado en temperaturas especificadas.

**Pregunta** ¿Por qué al dejar correr agua caliente sobre la tapa de un frasco la afloja?

**Respuesta** El metal se expande más que el vidrio, y la tapa se sale del frasco.



© Dibrova/Shutterstock

Las ranuras de expansión permiten que los puentes alteren su longitud con los cambios de temperatura, sin daño.



© RicardoMiguel.pt/Shutterstock

**Figura 9-9** En los termostatos se emplea una tira de dos metales para controlar los hornos.



## Congelamiento de lagos

La vida tal como la conocemos depende de las singulares propiedades de expansión térmica del agua. Todos los materiales cambian de tamaño cuando se modifican sus temperaturas. Debido a que la densidad es la razón de la masa entre el volumen y debido a que la masa de un objeto no cambia cuando se calienta o enfría, un cambio en el tamaño significa una modificación en la densidad del objeto.

Como se mencionó en el capítulo, casi todos los objetos se expanden cuando se calientan y se contraen cuando se enfrían. El comportamiento del agua no es tan sencillo. Durante casi todo su rango de líquido, el agua se comporta tal como se espera, y su volumen disminuye cuando baja su temperatura. Sin embargo, cuando el agua se enfría por debajo de  $4^{\circ}\text{C}$ , se expande.

Esta singular propiedad afecta el modo en que se congelan los lagos. Mientras se enfrían hacia  $4^{\circ}\text{C}$ , el agua de la superficie se vuelve más densa y por lo tanto, se hunde (capítulo 8) lo cual enfría el lago completo. Sin embargo, una vez que todo el lago está a  $4^{\circ}\text{C}$ , el agua de la superficie se expande mientras se sigue enfriando y se vuelve menos densa. Por lo tanto, el agua más fresca flota encima y sigue enfriándose hasta congelarse. Los lagos se congelan de arriba a abajo. Sin embargo, debido a que el hielo es un buen aislante térmico, casi todos los lagos no se congelan en la parte inferior. Si el agua fuera como casi todos los otros materiales, el agua muy fría se hundiría y los lagos se congelarían de abajo hacia arriba, lo cual crearía un desafiante problema evolutivo para toda la vida acuática y marina.



© Charles D. Winters

Debido a que el agua es más densa que el hielo, el hielo flota y cubre los lagos y los estanques en invierno. La capa de hielo protege el agua que está debajo de las temperaturas de congelación del aire.

## Resumen

La ley de la conservación de la energía mecánica no se aplica cuando están presentes efectos de fricción. A menudo la transformación de la energía mecánica a energía térmica está acompañada por cambios de temperatura que producen modificaciones observables en el objeto. El calor y la temperatura no son lo mismo. El calor es una energía, y la temperatura es una propiedad macroscópica del objeto. El número de calorías requeridas para elevar  $1^{\circ}\text{C}$  la temperatura de 1 gramo de una sustancia se conoce como su calor específico.

La primera ley de la termodinámica nos dice que el cambio total en la energía interna de un sistema es la suma del calor incorporado al sistema y el trabajo efectuado en el sistema. Ésta es sólo otra manera de plantear la ley de la conservación de la energía. La aplicación de 4.2 joules de trabajo sobre un sistema equivale a agregar 1 caloría de energía térmica. Parte de esta energía aumenta la energía cinética promedio de los átomos; la temperatura absoluta es directamente proporcional a esta energía cinética promedio. Otras partes de esta energía rompen los enlaces entre las moléculas y hacen que las sustancias cambien de sólidos a líquidos y de líquidos a gases. A temperaturas más altas, las moléculas, los átomos, e incluso los núcleos se separan.

Existe un límite de cuánta energía interna pueda eliminarse de un objeto y, por lo tanto, hay una temperatura más baja posible —el cero absoluto, o  $-273^{\circ}\text{C}$ —, igual que el cero en la escala Kelvin. Una sustancia a cero absoluto tiene la energía interna más baja posible.

La temperatura de una sustancia no cambia mientras experimenta un cambio de estado físico. La energía que se libera o se adquiere por gramo de material se conoce como el calor latente.

El flujo natural de la energía térmica siempre es de los objetos más calientes a los más fríos. En el proceso llamado conducción, se transfiere energía térmica mediante colisiones entre las partículas; en la convección, la transferencia ocurre a través del movimiento de las partículas; y en la radiación la energía se transmite mediante ondas electromagnéticas.

## Capítulo 9



## Revisión

La velocidad con la que un objeto irradia energía se determina mediante la diferencia en la temperatura entre el objeto y su entorno, el área superficial del objeto, y las características de la superficie. El cambio de la temperatura del objeto depende principalmente de la cantidad de energía que irradia, la masa del objeto y el calor específico del material.

## TÉRMINOS IMPORTANTES

**aislante:** Un material que es un conductor deficiente de la energía térmica. La madera y el aire inmóvil son buenos aislantes térmicos.

**calor:** La energía que fluye debido a una diferencia en la temperatura.

**calor específico:** La cantidad de calor requerida para elevar  $1^{\circ}\text{C}$  la temperatura de 1 gramo de una sustancia.

**calor latente:** La cantidad de calor requerida para fundir (o vaporizar) 1 gramo de una sustancia. Se libera la misma cantidad de calor cuando 1 gramo de la misma sustancia se congela (o se condensa).

**caloría:** La cantidad de calor requerida para elevar  $1^{\circ}\text{C}$  la temperatura de 1 gramo de agua.

**cambio de estado:** El cambio de una sustancia entre sólido y líquido o entre líquido y gas.

**capacidad calorífica:** La cantidad de calor requerida para elevar  $1^{\circ}\text{C}$  la temperatura de un objeto.

**cero absoluto:** La temperatura más baja posible: 0 K,  $-273^{\circ}\text{C}$ , o  $-459^{\circ}\text{F}$ .

**conducción:** La transferencia de energía térmica mediante colisiones de los átomos o moléculas dentro de una sustancia.

**conductor:** Un material que permite un flujo fácil de la energía térmica. Los metales son buenos conductores.

**convección:** La transferencia de energía térmica en los fluidos por medio de corrientes, como el ascenso del aire caliente y el descenso del aire frío.

**energía interna:** La energía microscópica total de un objeto, la cual incluye sus energías cinéticas de traslación y de rotación atómica y molecular, la energía de vibración, y la energía almacenada en los enlaces moleculares.

**energía térmica:** La energía interna.

**equilibrio térmico:** Una condición en la cual no hay un flujo neto de energía térmica entre dos objetos. Esto ocurre cuando los dos objetos alcanzan la misma temperatura.

**expansión térmica:** El aumento en el tamaño de un material cuando se calienta.

**ley cero de la termodinámica:** Si los objetos A y B están en equilibrio termodinámico con el objeto C, entonces A y B están en equilibrio termodinámico entre sí. Los tres objetos están a la misma temperatura.

**primera ley de la termodinámica:** El aumento en la energía interna de un sistema es igual al calor incorporado más el trabajo efectuado sobre el sistema.

**radiación:** La transmisión de energía mediante ondas electromagnéticas.

**tercera ley de la termodinámica:** El cero absoluto se puede aproximar de manera experimental, pero nunca se puede alcanzar.

**termodinámica:** El área de la física que aborda las relaciones entre el calor y otras formas de energía.

**unidad térmica británica:** La cantidad de calor requerida para elevar  $1^{\circ}\text{F}$  la temperatura de 1 libra de agua.

## PREGUNTAS CONCEPTUALES

1. En una avalancha, la nieve y el hielo comienzan en reposo en la cima de una montaña y terminan en reposo al pie de la montaña. ¿Qué le ocurre a la energía gravitacional potencial que se pierde en el proceso?
2. ¿Qué le sucede a la energía de sonido de las bocinas de su estéreo?
3. ¿Qué evidencia tenía Rumford de que el calor no era un fluido?
4. Suponga que un estudiante no tuvo cuidado para recrear el experimento de Joule y permitió que las masas se aceleraran rápido mientras descendían hacia el piso. Si igualó el cambio en la energía gravitacional potencial con el cambio en la energía térmica, ¿hubiera encontrado que 1 caloría es mayor o menor que 4.2 joules? Explique.
5. ¿En qué se asemejan los conceptos de trabajo y calor? ¿En qué se diferencian?

6. ¿Qué esperaría encontrar si mide la temperatura del agua en la parte superior y en la parte inferior de las cataratas del Niágara? Explique su razonamiento.



© Vladyslav Staher/Stocklib

7. Podría argumentarse que la única ocasión que usted mide la temperatura sin alterar un sistema es cuando la lectura del termómetro no cambia cuando se pone en contacto térmico con el sistema. Utilice la ley cero para explicar por qué ocurre esto.
8. Imagine un universo en donde la ley cero de la termodinámica no fuera válida. ¿Todavía tendría sentido en este universo el concepto de temperatura? ¿Por qué sí o por qué no?
9. ¿Pueden dos objetos estar en contacto pero no estar en equilibrio térmico? Explique.
10. Es posible que un cubo de agua en Los Ángeles y un cubo de agua en la ciudad de Nueva York estén en equilibrio térmico? Explique.
11. ¿Por qué es incorrecto hablar del flujo de temperatura de un objeto caliente a uno más frío?
12. Al final de este libro están los factores de conversión entre diferentes unidades. ¿Por qué no existe un factor de conversión entre joules y kelvins?
13. ¿Cuál es la diferencia entre calor y temperatura?
14. Fluye la misma cantidad de calor hacia dos cubos de agua, que al principio están a la misma temperatura. ¿Necesariamente ambos cubos terminarán a la misma temperatura? Explique.
15. Patrick afirma, “Dos cubos de agua deben tener el mismo calor si están a la misma temperatura”. Victoria replica, “Eso sólo es cierto si ambos cubos contienen la misma cantidad de agua”. ¿Con cuál de estos estudiantes, de ser el caso, coincide usted? Explique.
16. ¿Cómo se comparan las energías internas de un vaso de agua y un galón de agua a la misma temperatura?
17. ¿Bajo cuáles condiciones es válida la primera ley de la termodinámica?
18. Se efectúa un trabajo sobre un sistema sin modificar la energía interna del sistema. Durante este proceso, ¿entra o sale calor del sistema? Utilice la primera ley de la termodinámica para justificar su respuesta.
19. ¿Se requiere más energía térmica para elevar  $6^{\circ}\text{C}$  la temperatura de 5 gramos de agua o de 5 gramos de hielo? Explique.
20. ¿Cuáles de los siguientes no afectan la cantidad de energía interna que posee un objeto: su temperatura, la cantidad de material, su estado, el tipo de material, o su forma?
21. El líquido X y el gas Y tienen calores específicos idénticos. ¿Cien calorías de calor aumentarían la temperatura de

1 litro del líquido X la misma cantidad que 1 litro del gas Y? Explique su razonamiento.

22. Un kilogramo del material A a  $80^{\circ}\text{C}$  se pone en contacto térmico con 1 kilogramo del material B a  $40^{\circ}\text{C}$ . Cuando los materiales alcanzan un equilibrio térmico, la temperatura son  $52^{\circ}\text{C}$ . ¿Cuál material, si es el caso, tiene el calor específico más alto? Explique.
23. Un bloque de aluminio caliente se deja caer en 1000 gramos de agua a temperatura ambiente en un recipiente térmicamente aislado, en donde alcanzan un equilibrio térmico. Si en lugar de eso se hubieran utilizado 500 gramos de agua, ¿la cantidad de calor transferida al agua sería mayor, igual, o menor que antes? ¿Por qué?
24. Un bloque de hierro caliente se deja caer en 1000 gramos de agua a temperatura ambiente en un recipiente térmicamente aislado, en donde alcanzan un equilibrio térmico. Si se hubiera utilizado el doble de agua, ¿el cambio en la temperatura del agua sería mayor, igual, o menor que antes? ¿Por qué?
25. ¿Por qué los climas cerca de las costas tienden a ser más moderados que los climas en medio del continente?
26. ¿Por qué la parte más fría del invierno ocurre a fines de enero y febrero, cuando el día más corto está cerca del 21 de diciembre?
27. Dado que las temperaturas de fusión y de congelación del agua son idénticas, ¿qué determina si una mezcla de hielo y agua se congela o se funde?
28. Si comete el error de retirar cubos de hielo del congelador con las manos húmedas, los cubos se pegan a sus manos. ¿Por qué el agua en sus manos se congela en lugar que se derritan los cubos?



© George Sample

29. ¿Por qué un iceberg sobrevive durante varias semanas flotando en el agua de mar que no está en el punto de congelación?



© Alexander Kolomietz/Dreamstime



30. El punto de ebullición para el nitrógeno líquido a la presión de la atmósfera son 77 K. ¿La temperatura de un recipiente abierto de nitrógeno líquido es más alta, más baja, o igual a 77 K? Explique.
31. Cien gramos de hielo a 0°C se agregan a 100 gramos de agua a 80°C. El sistema se conserva térmicamente aislado de su ambiente. ¿La temperatura de equilibrio de la mezcla será mayor, igual, o menor que 40°C? Explique su razonamiento.
32. Un cubo de hielo a 0°C se pone en un vaso de espuma de poliestireno que contiene 200 gramos de agua a 60°C. Cuando el sistema alcanza un equilibrio térmico, su temperatura son 30°C. ¿La masa del cubo de hielo era mayor, igual, o menor que 200 gramos? Explique su razonamiento.
33. ¿Por qué el vapor a 100°C es más peligroso que el agua a 100°C?
34. Se descubre un líquido nuevo que tiene un punto de ebullición y un calor específico iguales a los del agua, pero un calor latente de vaporización de 10 calorías por gramo. Suponiendo que es seguro beber este líquido nuevo, ¿sería más o menos conveniente que el agua para hervir huevos? ¿Por qué?
35. Un sistema está térmicamente aislado de su entorno. ¿Es posible ejecutar un trabajo sobre el sistema sin cambiar su energía interna? ¿Es posible efectuar un trabajo sobre el sistema sin modificar su temperatura? Explique.
36. En Washington, D. C., el informe del clima a veces declara que la temperatura son 95°F y que la humedad es de 95%. ¿Por qué la humedad alta lo hace tan incómodo?
37. Utilice un modelo microscópico para explicar cómo transporta energía térmica una barra metálica del extremo caliente al frío.
38. ¿Por qué la colocación de una alfombra sobre el piso de mosaicos de un baño lo hace menos frío para los pies descalzos?
39. Clasifique los materiales siguientes en términos de su capacidad aislante: aire inmóvil, espuma de poliuretano y concreto.
40. ¿Cuál de los siguientes es el mejor conductor térmico: fibra de vidrio, acero inoxidable, madera, o plata?
41. Si la temperatura son 35°F y el viento sopla a 20 mph, la temperatura del factor de congelación equivalente son 24°F. En esta situación, ¿se congelará un vaso con agua? Explique su razonamiento.
42. Escucha en el informe del clima de la mañana que la temperatura exterior son -5°F, con una temperatura equivalente del factor de congelación de -40°F. Sabe que su automóvil usado, estacionado afuera, no encenderá si la temperatura de la batería es menor de -15°F. ¿Su automóvil encenderá esta mañana? ¿Por qué sí o por qué no?
43. Las conductividades térmicas respectivas del hierro y el acero inoxidable son  $79 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$  y  $14 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$ . Utilice esta información para explicar por qué necesita utilizar agarradores para las ollas con manijas de hierro, pero no para las ollas con manijas de acero inoxidable.
44. ¿Por qué un cocinero pone pinchos de aluminio grandes en las papas antes de cocinarlas?

45. Los conductores en climas del norte suelen encontrar señales que dicen “EL PUENTE SE CONGELARÁ ANTES QUE LA CARRETERA”. ¿Por qué ocurre esto?
46. Se acaba de preparar una tasa de café y está a punto de agregarle crema, la cual está a temperatura ambiente. De repente suena el teléfono y tiene que salir a contestarlo. ¿Es mejor agregar la crema al café antes de salir o después de regresar si quiere su café lo más caliente posible? ¿Por qué?
47. Cuando los pilotos vuelan bajo las nubes, suelen experimentar una corriente de aire descendente. ¿Por qué ocurre esto?



48. A media tarde, usted rema en una canoa por un río que desagua en un lago grande. Le cuesta trabajo avanzar debido a un viento frío en su cara. ¿Es probable que esta situación mejore o empeore cuando se ponga el Sol? Explique.
49. Un automóvil negro y uno blanco están estacionados uno junto al otro en un día soleado. La superficie del automóvil negro se calienta mucho más que la del blanco. ¿Cuál modo de transmisión de energía es responsable de esta diferencia?
50. Suponga que prepara una videocinta en una cafetería con equipo sensible al infrarrojo. ¿Cómo puede saber cuáles tazas de café están llenas?
51. Una botella térmica suele estar hecha de dos recipientes de vidrio anidados, con un vacío entre ellos, como se aprecia en la figura. Asimismo, las paredes se recubren con plata.



Preguntas 51 y 52

- ¿De qué manera este diseño minimiza la pérdida de energía térmica?
52. ¿Una botella térmica (como la de la figura) mantendrá algo frío tan bien como lo mantiene caliente? Explique.
  53. El techo metálico de un cobertizo de madera hace ruido cuando las nubes bloquean el Sol. ¿Por qué?
  54. ¿Por qué se rompe un plato de vidrio que se saca del horno y se pone en agua fría?
  - ▲ 55. Suponga que la columna en un termómetro de alcohol en vidrio no es uniforme. ¿Cómo podría compararse el espaciamiento entre los grados en una porción amplia del termómetro con los de una porción estrecha?
  - ▲ 56. Cuando un termómetro de mercurio se pone primero en agua caliente, el nivel del mercurio desciende ligeramente antes de comenzar a ascender. ¿Por qué?

## EJERCICIOS

1. ¿Cuánto calor se requiere para aumentar de 20 a 30°C la temperatura de 400 g de agua?
2. Si la temperatura de 500 g de agua disminuye 8°C, ¿cuánto calor se libera?
- ▲ 3. ¿Cuánto trabajo se requiere para impulsar un cajón con una fuerza de 200 N por el suelo una distancia de 6 m? ¿Cuántas calorías de energía térmica produce la fricción?
- ▲ 4. ¿Cuántos joules de energía gravitacional potencial se convierten a energía cinética cuando 100 g de perdigones de plomo caen desde una altura de 50 cm?
- ▲ 5. Un estudiante de física ingenuamente quiere perder peso al beber agua fría. Si bebe 1 L (1000 cm<sup>3</sup>) de agua a 10°C menos que la temperatura corporal, ¿cuántas Calorías requerirá para calentar el agua?
6. Un corredor normal consume energía alimentaria a una velocidad de cerca de 40 kJ por minuto. ¿Cuánto requeriría correr para compensar un pastel que contiene 400 Calorías?
7. Durante un proceso, se transfieren a un sistema 20 J de calor, mientras que el sistema mismo hace un trabajo de 12 J. ¿Cuál es el cambio en la energía interna del sistema?
8. ¿Cuál es el cambio en la energía interna de un sistema si se aplican 15 J de trabajo sobre el sistema y se eliminan 6 J de calor del sistema?
9. Cuando se comprimió un gas ideal, su energía interna aumentó 180 J y emitió 150 J de calor. ¿Cuánto trabajo se efectuó sobre este gas?
10. Si la energía interna de un gas ideal aumenta 150 J cuando se hace un trabajo de 240 J para comprimirlo, ¿cuánto calor se libera?
11. Se requieren 250 calorías para elevar la temperatura de un anillo metálico de 20 a 30°C. Si el anillo tiene una masa de 90 g, ¿cuál es el calor específico del metal?
12. Se necesitan 3400 calorías para elevar 44°C la temperatura de una estatua de 500 g, ¿cuál es el calor específico del material utilizado para hacer la estatua?
13. ¿Cuántas calorías se requerirán para aumentar la temperatura de una cadena de oro de 50 g de 20 a 100°C?
14. ¿Cuántas calorías se requerirán para elevar la temperatura de una cacerola de aluminio de 400 g de 293 a 373 K?
15. Seis gramos del líquido X a 35°C se agregan a 3 gramos del líquido Y a 20°C. El calor específico del líquido X son 2 cal/g · °C, y el calor específico del líquido Y es 1 cal/g · °C. Si cada gramo del líquido X cede dos calorías al líquido Y, determine el cambio en la temperatura de cada líquido.
16. En el ejercicio 15, imagine que el líquido X continúa transfiriendo energía al otro líquido 12 calorías cada vez. ¿Cuántas transferencias se requerirán para alcanzar una temperatura común? ¿Cuál es la temperatura de equilibrio?
17. En un recipiente completamente aislado, se mezclan 80 gramos de agua a 70°C con una cantidad igual de agua a 30°C. La temperatura final del agua son 50°C.
  - a. ¿Cuánto calor pierde el agua caliente?
  - b. ¿Cuánto calor adquiere el agua fría?
  - c. ¿Qué le ocurre a la cantidad total de energía interna del sistema?
- ▲ 18. Si se mezclan 200 g de agua a 100°C con 300 g de agua a 50°C en un recipiente completamente aislado, ¿cuál es la temperatura de equilibrio final?
19. Una tetera que contiene 3 kg de agua ha alcanzado su punto de ebullición. ¿Cuánta energía, en joules, se requiere para que la tetera hierva hasta secarse?
20. ¿Cuánto calor se requiere para fundir un bloque de hielo de 1 kg?
21. Usted desea fundir un bloque de aluminio de 3 kg, el cual al principio está a 20°C. ¿Cuánta energía, en joules, se necesita para que el bloque alcance su punto de fusión de 660°C? ¿Cuánta energía, en joules, se requiere para fundir el aluminio sin cambiar su temperatura?
- ▲ 22. ¿Cuánto calor se requiere para convertir 400 g de hielo a -5°C en agua a 5°C? (Sugerencia: revise el ejercicio 21.)
23. ¿Cuál es el cambio en la longitud de una barra metálica con una longitud original de 2 m, un coeficiente de expansión térmica de 0.00002/°C, y un cambio de temperatura de 20°C?
24. Un riel de ferrocarril de acero tiene 24.4 m de longitud. ¿Cuánto se expande durante un día cuando la temperatura baja son 50°F (18°C) y la temperatura alta son 91°F (33°C)?





# 10 Electricidad



© Pakowacz/Shutterstock

*Una tormenta de rayos produce voltajes muy altos, y crea corrientes eléctricas muy grandes y peligrosas.*

Vemos los efectos de la electricidad cuando sacamos chispas. En los días muy secos, podemos sentir un choque cuando tocamos un pomo de puerta metálico después de caminar sobre una alfombra. Si miramos con atención, vemos saltar una chispa entre nuestra mano y el pomo. Aunque pueden sorprendernos, las chispas no nos dañan. Por otra parte, la naturaleza produce chispas muy prolongadas y peligrosas durante las tormentas eléctricas. ¿Qué determina la magnitud de las chispas?

---

(Consulte la respuesta a esta pregunta en la página 195.)

---

Los griegos antiguos sabían que el ámbar, la savia fosilizada de un árbol que en la actualidad se usa en joyería, tenía la interesante capacidad de atraer pedazos de fibra y cabello después que se frotaba con una piel. Éste era un modo de reconocer un objeto que estaba electrificado. En la terminología moderna, decimos que el objeto está **cargado**. Esto no explica lo que es una **carga**, pero es un modo útil de denominar esta condición.

En 1600, el científico inglés William Gilbert publicó una obra pionera, *De Magnete*, en la cual señalaba que este efecto eléctrico no era una propiedad aislada del ámbar, sino una propiedad mucho más general de la materia. Los materiales como las gemas, el vidrio y el lacre también pueden cargarse. Frotar entre sí dos objetos hechos de diferentes materiales era el modo más común de cargar un objeto. De hecho, se cargan ambos objetos.

Después de Gilbert, muchos experimentadores se dedicaron a investigar la electricidad. Sin embargo, la pregunta de lo que sucede cuando un objeto gana o pierde esta propiedad eléctrica sigue sin respuesta. Una respuesta moderna incluiría palabras como *electrón* o *protón*. Pero debemos tener cuidado para no simplemente reemplazar con palabras o frases nuevas las antiguas. Para responder esta pregunta por completo y, por lo tanto, ampliar nuestra visión del mundo, necesitamos examinar con atención nuestro mundo eléctrico.

## Propiedades eléctricas

En un esfuerzo por explicar la electricidad, Gilbert propuso la existencia de un fluido eléctrico en ciertos tipos de objetos. Sugirió que frotar un objeto retiraba una parte de este fluido y lo dejaba en la región que rodeaba al objeto. La corriente provocada por el fluido al regresar al objeto atraía trozos de fibra hacia el objeto. Aunque muchos otros fenómenos eléctricos no podían explicarse con esta idea, fue el primer intento para modelar los procesos invisibles fundamentales que provocaban los efectos eléctricos.

Durante más de un siglo se avanzó muy poco. En la década de 1730 se demostró que la carga de un objeto se transfería a un objeto distante si se conectaba con cables metálicos, pero no con hilos de seda. Los materiales capaces de transferir una carga se llaman **conductores**; los que no la transfieren se denominan no conductores, o **aislantes**. Se descubrió que los metales, el cuerpo humano, la humedad, y algunas otras sustancias eran conductores.

El descubrimiento de que la humedad es un conductor explica por qué los efectos eléctricos varían de un día a otro. Es normal que experimente choques más intensos en el invierno, cuando la humedad natural es baja. En los días más húmedos, la humedad en el aire que rodea su cuerpo disipa rápido cualquier carga que adquiere al arrastrar sus pies.

Los camiones con combustible se conectan a tierra para eliminar la carga acumulada por el combustible cuando fluye por las mangueras.



Muchos objetos cargados deben colgarse de aislantes como hilos de seda o bases de plástico, o pierden rápidamente sus cargas en la tierra. De hecho, hablamos de **aterizar** un objeto para asegurar que no está cargado. Otros objetos mantienen sus cargas sin estar aislados. Cuando cargamos una barra de plástico al frotarla con una tela, la carga permanece en la barra incluso si la asimos. Pero nuestros cuerpos son conductores. ¿Por qué la carga no fluye hacia tierra a través de nuestros cuerpos? Permanece en la barra porque ésta es un aislante, y la carga generada en un extremo permanece ahí. La carga puede eliminarse al pasar a nuestras manos por el extremo cargado. Cuando tocamos las regiones cargadas, las cargas fluyen a través de nuestros cuerpos hacia tierra.

Una barra metálica no puede cargarse al sostenerla en nuestras manos y frotarla contra una tela, porque el metal conduce la carga hacia nuestras manos. Una barra metálica se carga si se monta en una base aislante o si la sostenemos con un guante aislante; es decir, la barra debe aislarse de su entorno.

Incluso el flujo de un líquido por una tubería basta para cargar el líquido. Los camiones con combustible tienden a acumular una carga cuando despachan el combustible. Si esta carga se vuelve bastante grande, pueden ocurrir chispas y provocar un incendio o una explosión. Para evitar este peligro, se conecta un cable conductor del camión al suelo para permitir que la carga fluya hacia la tierra.

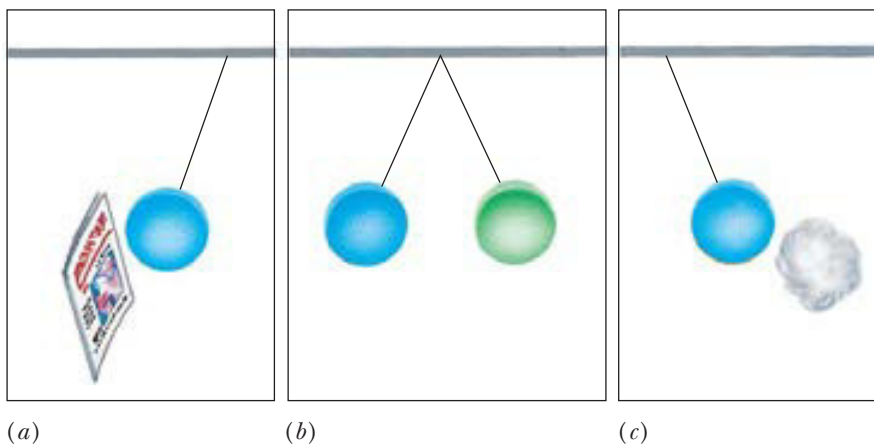
### FÍSICA | HÁGALO USTED MISMO

Observe las chispas cuando efectúa una de estas acciones en una habitación a oscuras: (1) Separe algunas prendas recién sacadas de una secadora. (2) Jale rápido un poco de cinta transparente de su rollo. (3) Peine su cabello y acerque el peine a un objeto metálico.

## Dos tipos de cargas

También desde principios de la década de 1730 se mencionó que los objetos cargados se repelían entre sí. Se creía que la electricidad, igual que la gravedad, sólo atraía. Ahora esto puede parecernos extraño, porque los aspectos de atracción y repulsión de la electricidad son fáciles de demostrar. Si peina su cabello, el peine se carga y sirve para atraer pedazos de papel pequeños. Después de entrar en contacto con el peine, éste repele algunos de estos pedazos.

Este fenómeno se puede investigar con más atención mediante globos y pedazos de lana. Si frotamos un globo con un pedazo de lana, el globo se carga; atrae pedazos de papel pequeños y se pega en las paredes o el techo. Si colgamos este globo de un hilo y le acercamos objetos no cargados, los objetos atraen el globo (figura 10-1[a]). Todo parece un efecto atrayente.



**Figura 10-1** (a) Los objetos no cargados atraen un globo cargado. (b) Un globo con una carga idéntica repele un globo cargado. (c) La lana utilizada para cargarlo, atrae un globo cargado.



Si carga otro globo de la misma manera, comprueba el efecto nuevo: los dos globos se repelen entre sí (figura 10-1[b]). Debido a que creemos que dos objetos cualesquiera preparados del mismo modo se cargan de la misma manera, llegamos a la idea de que los objetos con una carga igual se repelen entre sí.

Cuando cargamos un objeto al frotarlo con otro, ambos objetos se cargan. Si examinamos los pedazos de lana, encontramos que también están cargados: atraen pedazos de papel.

**Pregunta** ¿Dos pedazos de lana se atraerán o repelerán entre sí?

**Respuesta** Debido a que se han cargado de la misma manera, se repelerán entre sí.

Sin embargo, el pedazo de lana y el globo se atraen entre sí después de frotarse juntos (figura 10-1[c]). Si tienen el mismo tipo de carga, deben repelerse. Por lo tanto, llegamos a la idea de que deben existir dos tipos diferentes de carga y que los dos tipos se atraen. Estos experimentos se resumen así

Cargas iguales se repelen; cargas diferentes se atraen.

## FÍSICA | HÁGALO USTED MISMO

Realice los experimentos con la lana y los globos descritos en el texto.



**Figura 10-2** La carga en la barra de vidrio se llama positiva. Esto se indica mediante algunos signos de más.

## Conservación de la carga

Igual que Gilbert, Benjamin Franklin creía que la electricidad era un fluido único y que un exceso de este fluido provocaba un tipo de estado cargado, mientras que una deficiencia generaba el otro. Debido a que no podía saber cuál era cuál, nombró arbitrariamente un tipo de carga positiva y el otro tipo, negativa. Por convención, la carga de una barra de vidrio frotada con una película de seda o de plástico es positiva (figura 10-2); mientras que la de un ámbar o una barra de hule frotada con lana o piel, es negativa.

A primera vista, estos nombres parecen no tener una ventaja sobre otras opciones posibles, como blanco y negro, o yin y yang. Sin embargo, fueron más significativos. El uso de Franklin del modelo del fluido lo llevó a predecir que la carga debía conservarse. La cantidad de fluido eléctrico debe permanecer igual; sólo se transfiere de un objeto a otro. Si usted comienza con dos objetos no cargados y los frota entre sí, la cantidad de fluido en exceso en uno es igual a la deficiencia en el otro. En otras palabras, las cargas positivas y negativas son iguales. Con su sistema de números positivos y negativos, podemos sumarlos y ver que la carga total sigue siendo cero.

Ya no confiamos en el modelo de fluidos de Franklin; el modelo de fluidos se abandonó porque no pudo explicar observaciones experimentales posteriores. Sin embargo, la idea de Franklin acerca de la conservación de la carga se ha verificado con una muy alta precisión. Es una de las leyes fundamentales de la física. Esa forma generalizada, se expresa así

conservación de la carga ➤

En un sistema aislado, se conserva la carga total.

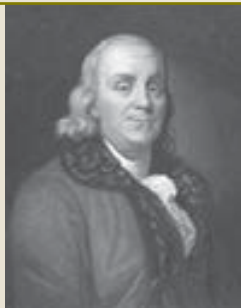
En nuestra visión moderna del mundo de la física, todos los objetos están formados por electrones con carga negativa, protones con carga positiva y neutrones no cargados. La carga de un electrón y la carga de un protón tienen la misma magnitud. Un objeto no está cargado (o es neutro) porque tiene cantidades iguales

## FRANKLIN | El Newton estadounidense

Cuando Benjamin Franklin (1706-1790) llegó a París como embajador del Estados Unidos revolucionario, fue conocido entre los amables franceses como un famoso científico que “robó el centro al tirano y el rayo a los dioses”. Precisamente porque era el “Newton estadounidense”, fue el representante más eficaz que la joven nación en ciernes pudo enviar.

Nacido en Boston, Franklin obtuvo fortuna y reputación en Filadelfia; en esa época, la ciudad de habla inglesa más grande fuera de Londres. Fue una Cámara de Comercio de un solo hombre que aceptó a los recién llegados, incorporó jóvenes prometedores en su círculo de amigos, y ayudó a organizar todo, desde la primera sociedad filosófica en el país, hasta un distrito con calles iluminadas, un departamento de bomberos, y un hospital mental. Sus publicaciones sobre la electricidad lo hicieron miembro de la Royal Philosophical Society of London. (Newton había sido presidente de ella apenas 50 años antes.) Inventó el pararrayos y lo utilizó en su propia casa con gran efecto.

Franklin creía que la electricidad era un fluido que invadía todos los cuerpos en cantidades variables. Parecía que un cuerpo



Benjamin Franklin

© Georgios Kallidas/Dreamstime

buscaba conservar un equilibrio eléctrico. Si existía un déficit, el cuerpo estaba en un estado negativo, y la electricidad fluía dentro de él. Si había un excedente, la electricidad se escapaba. También creía que, a diferencia de la gravitación, que sólo es atrayente, la materia electrificada podía repeler o atraer otra materia electrificada. También podía atraer materia no electrificada.

Como otros en su época, también se interesó en el calor, la iluminación, el clima, y otros aspectos de la ciencia. Igual que Michael Faraday un poco después, Franklin no era un matemático, de modo que no podía dar forma definitiva a sus argumentos. Aún así, este reconocido patriota fue el más conocido de los primeros científicos estadounidenses y un ser humano fascinante.

—Pierce C. Mullen, historiador y autor

Fuentes: Carl Van Doren, *Benjamin Franklin* (Nueva York: Viking Press, 1938) y *The Autobiography of Benjamin Franklin* (Nueva York: Dover Publishing, Thrift Editions, 1966).

de cargas positivas y negativas, no porque no contenga cargas. Por ejemplo, los átomos son eléctricamente neutros porque tienen la misma cantidad de electrones y protones.

Los objetos cargados positivamente pueden tener un exceso de cargas positivas o una deficiencia de cargas negativas; es decir, un exceso de protones o una deficiencia de electrones. Los llamamos simplemente cargados positivamente porque los efectos eléctricos son iguales en ambas situaciones.

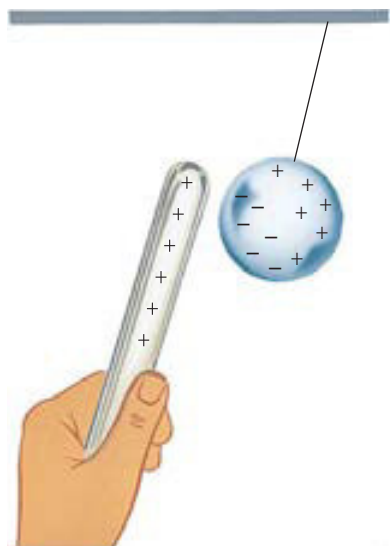
La visión moderna explica fácilmente la conservación de una carga al cargar objetos. La frotación simplemente provoca la transferencia de electrones de un objeto al otro; lo que un objeto pierde, el otro lo gana.

**Pregunta** Si quita un electrón de una moneda neutra y un electrón de un automóvil neutro, ¿cuál (de ser así) tiene la carga neta más grande?

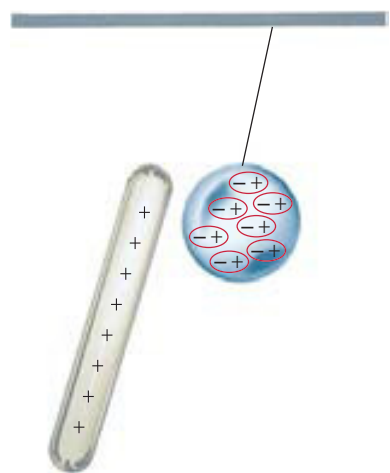
**Respuesta** En cualquier caso, cada protón se aparea con un electrón, excepto para uno. La carga neta en cualquier objeto sería la carga de un solo protón.

## Atracciones inducidas

La atracción es más común que la repulsión, porque los objetos cargados pueden atraer objetos *no cargados*. ¿Cómo explicamos la observación de que los objetos cargados atraen los objetos no cargados? Considere una barra cargada positivamente y una bola metálica no cargada. Cuando la barra se acerca a la bola, las cargas positivas de la barra atraen las cargas negativas y repelen las cargas positivas de la bola. Debido a que las cargas en la bola pueden moverse, esto produce un exceso de cargas negativas en el extremo cercano y un exceso de cargas positivas en el extremo lejano de la bola (figura 10-3). Como se conserva la carga, el exceso de carga negativa en un lado es igual al exceso de carga positiva en el otro. Los experimentos con globos muestran que la fuerza eléctrica varía con la distancia; la fuerza se debilita cuando los globos se alejan. Por lo tanto, la barra atrae la carga negativa de la bola más de lo que repele su carga positiva. Estas cargas inducidas producen una atracción neta de la bola no cargada hacia la barra.



**Figura 10-3** Una barra cargada atrae una bola metálica neutra debido a la separación inducida de las cargas.



**Figura 10-4** Un objeto aislante es atraído debido a la separación de las cargas dentro de las moléculas.

Los experimentos muestran que si la bola está hecha de un material aislante, todavía ocurre una atracción. En los aislantes, la carga no está en libertad de moverse a través del objeto, pero puede haber un movimiento a nivel molecular. Aunque las moléculas no estén cargadas, la presencia de la barra cargada puede inducir una separación de la carga dentro de la molécula. Otras moléculas son naturalmente más positivas en un extremo y más negativas en el otro. La barra positiva gira estas moléculas polares, de modo que sus extremos negativos se acerquen a la barra, como se aprecia en la figura 10-4. Una vez más, esto produce una fuerza atrayente neta.

### FÍSICA | HÁGALO USTED MISMO

Pase un peine por su cabello y luego póngalo en un delgado chorro de agua de un grifo. ¿Cómo se explica lo que sucede?

Un ejemplo particularmente gráfico de la atracción de un aislante no cargado se presenta en la figura 10-5. Una tabla larga de dos por cuatro se equilibra sobre el vidrio de un reloj para que la tabla esté en libertad de girar. Cuando se acerca una barra cargada a un extremo, la fuerza atrayente resultante produce una torsión que hace girar la tabla.

**Pregunta** Suponiendo que la tabla de dos por cuatro fue atraída por una barra cargada positivamente en el ejemplo anterior, ¿en cuál dirección giraría si se usara una barra cargada negativamente?

**Respuesta** Giraría en la misma dirección. La interacción entre cualquier objeto cargado y uno no cargado siempre es atrayente.

Ahora podemos regresar al peine cargado que atrajo y luego repelió pedazos de papel. Al principio, los pedazos de papel no están cargados. El peine los atrae por medio de una carga inducida. Cuando los pedazos de papel tocan el peine, adquieren parte de la carga del peine y son repelidos, porque el peine y el papel tienen cargas con el mismo signo y las cargas iguales se repelen entre sí.

### Razonamiento defectuoso



Su maestra demuestra que una barra de vidrio cargada atrae el polo sur de un imán en barra. Después pide al grupo que prediga lo que ocurrirá cuando la barra de vidrio cargada se acerca al polo norte del imán. El mejor estudiante del grupo contesta, “La barra de vidrio está cargada positivamente, de modo que el polo sur del imán debe estar cargado negativamente. Sé que un polo norte atraerá un polo sur, de modo que los polos nortes de los imanes deben estar positivamente cargados. Predigo que la barra de vidrio repelerá el polo norte del imán”.

Entonces su maestra efectúa el experimento y demuestra que la barra de vidrio *atrae* el polo norte. Después presenta que una barra de hule negativamente cargada también atrae ambos polos del imán, lo que demuestra que el imán debe ser eléctricamente neutro. Es evidente que el mejor estudiante de la clase cometió un error en su razonamiento. **¿Cuál es?**

**Respuesta** Una *atracción* eléctrica entre dos objetos sólo indica que cuando menos uno de ellos está cargado. El grupo ya sabía que la barra de vidrio estaba cargada, de modo que la primera demostración no indica nada acerca de la carga (en caso de tenerla) del imán. Si la barra cargada hubiera *repelido* uno de los polos del imán, hubiera indicado que el imán estaba cargado. Sin embargo, los imanes de barra normalmente no están cargados y sólo los atrae una barra cargada.



© David Rogers

**Figura 10-5** La fuerza atrayente de una barra cargada hace girar una tabla normal de dos por cuatro equilibrada sobre un plato curvo.

## El electroscope

En casi todos los experimentos, transferimos muy pocas cargas, de modo que la atracción o repulsión total es pequeña, comparada con la atracción de la gravedad. Detectar que un objeto está cargado se vuelve difícil a menos que sea muy ligero; como los pedazos de papel o un globo. Resolvemos esta dificultad con un dispositivo llamado *electroscopio*, el cual nos ofrece un resultado que se observa con facilidad cuando está cargado. Al acercar el objeto en cuestión al electroscopio, podemos deducir si está cargado o no, por el efecto que tiene sobre el electroscopio.

Las características esenciales de un electroscopio son una barra metálica con una bola metálica en la parte superior y dos hojas metálicas muy delgadas sujetas en la parte inferior. La figura 10-6 presenta un electroscopio casero construido con



© David Rogers



**Figura 10-6** Un electroscopio hecho con un matraz, una barra metálica y dos pedazos de hoja metálica delgadas.



**Figura 10-7** Cuando un electroscopio se carga mediante un contacto directo, tiene la misma carga que la barra.



un matraz de química. El envase de vidrio protege las hojas muy delgadas de las corrientes de aire y aísla eléctricamente las hojas y la barra del entorno.

Si el electroscopio no está cargado, las hojas cuelgan hacia abajo bajo la influencia de la gravedad. Cuando tocamos la bola del electroscopio con una barra cargada, la barra comparte una parte de su exceso de carga con el electroscopio. Las cargas fluyen de la barra al electroscopio porque las cargas en la barra se repelen entre sí y, por lo tanto, se distribuyen sobre la región más larga posible, la cual incluye la bola, la barra metálica y las hojas. Debido a que las hojas tienen el mismo tipo de carga, se repelen entre sí y se separan (figura 10-7). La separación de las hojas indica que el electroscopio está cargado; la magnitud de la separación es un indicio aproximado de la magnitud del exceso de carga. Esto ocurre cuando el electroscopio hace contacto con una barra positiva, al igual que con una negativa.

Cuando un objeto cargado toca un electroscopio, éste adopta el mismo tipo de carga que el objeto. Sin embargo, el electroscopio sólo muestra la presencia de una carga; no indica el signo. Podemos determinar el signo al acercar lentamente una barra con una carga positiva o negativa conocida hacia la bola del electroscopio cargado y al observar el movimiento de las hojas.

Por ejemplo, cuando una barra positiva se acerca al electroscopio, induce una redistribución de la carga en el electroscopio. Repele la carga positiva y atrae la negativa, provocando un aumento de la carga positiva (o una disminución en la carga negativa) de las hojas. Si las hojas al principio eran positivas, la carga positiva adicional haría que se alejaran más. Si las hojas al principio eran negativas, la carga positiva adicional cancelaría una parte de la carga negativa y las hojas se acercarían.

---

**Pregunta** Cuando una barra negativa se acerca lentamente a un electroscopio que al principio estaba cargado, las hojas se acercan. ¿Cuál es la carga en el electroscopio?

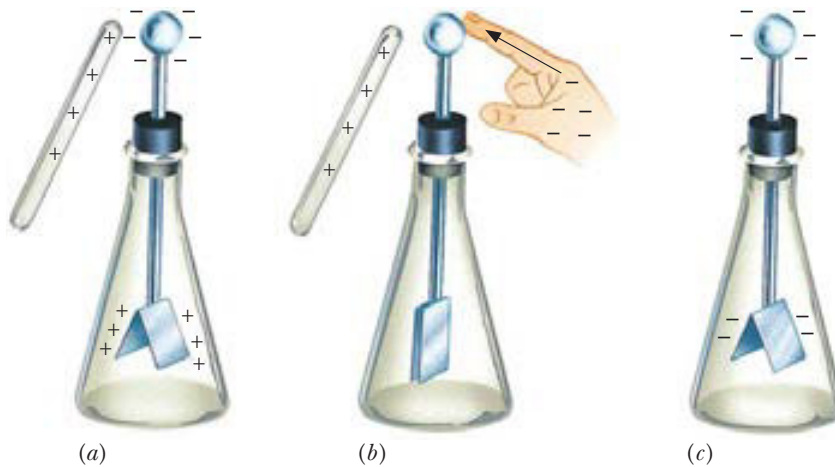
---

**Respuesta** La barra negativa repele las cargas negativas en la bola del electroscopio, lo que aumenta su concentración en las hojas. Debido a que esta carga negativa reduce la carga en las hojas, al principio deben haber sido positivas.

---

Una barra cargada también separará las hojas en un electroscopio no cargado. Cuando una barra positiva se acerca a un electroscopio no cargado, la bola de la parte superior atrae una parte de las cargas negativas del electroscopio; la bola tiene una carga negativa neta, y las hojas tienen una carga positiva neta, como se aprecia en la figura 10-8 (a). Observe que la carga neta en el electroscopio todavía es cero,





**Figura 10-8** (a) La barra cargada positivamente acercada al electroscopio atrae las cargas negativas a la bola, y deja las hojas con un exceso de carga positiva. (b) Al tocar la pelota con un dedo permite que las cargas negativas fluyan hacia el electroscopio, (c) y lo dejan con una carga negativa neta.

porque no lo tocamos con la barra. Sólo movimos las cargas en el electroscopio al acercar la barra cargada a la bola. Cuando se retira la barra cargada, las cargas se redistribuyen y las hojas caen. Ocurre un fenómeno similar con una barra negativa.

Imagine que mientras sostiene la barra positiva cerca del electroscopio, toca la bola con su dedo, igual que en la figura 10-8 (b). Una carga positiva grande en la barra atrae las cargas negativas, las cuales viajan desde el suelo por su cuerpo hasta el electroscopio. Si primero quita su dedo y después la barra, ahora el electroscopio está cargado y las hojas se repelen entre sí. Esto se conoce como cargar el electroscopio por inducción. El electroscopio adquiere una carga *opuesta* a la de la barra.

## La fuerza eléctrica

### ✓ MATEMÁTICAS

Las observaciones simples de la atracción o la repulsión de dos objetos cargados indican que la magnitud de la fuerza eléctrica depende de la distancia. Por ejemplo, un objeto cargado tiene más efectos sobre un electroscopio cuando se acerca. Pero necesitamos ser más precisos. ¿Cómo varía esta fuerza cuando cambia la separación entre dos objetos cargados? ¿Y cómo varía cuando se modifica la magnitud de la carga en los objetos?

En 1785, el físico francés Charles Coulomb midió los cambios en la fuerza eléctrica cuando variaba la distancia entre dos objetos y las cargas en ellos. Verificó que si se duplicaba la distancia entre dos objetos cargados (sin modificar las cargas), la fuerza eléctrica sobre cada objeto se reducía a una cuarta parte del valor inicial. Si se triplicaba la distancia, la fuerza se reducía a una novena parte, y así sucesivamente. Este tipo de comportamiento se conoce como una **relación cuadrada inversa**; *inversa* porque la fuerza se hace más pequeña cuando aumenta la distancia, *cuadrada* porque la fuerza cambia por el cuadrado del factor que se modifica la distancia.

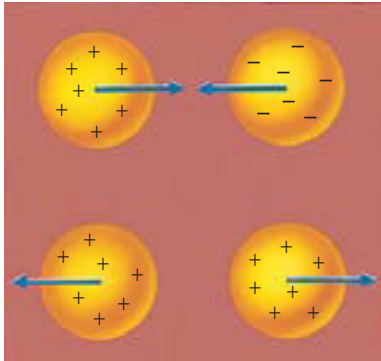
Coulomb también demostró que reducir a la mitad la carga en uno de los objetos reducía la carga eléctrica a la mitad de su valor original. La reducción a la mitad de la carga en cada uno disminuyó la fuerza a una cuarta parte del valor original. Esto significa que la fuerza es proporcional al producto de las dos cargas.

**Pregunta** Coulomb no pudo medir una carga directamente. ¿Cuál técnica pudo haber usado para reducir la carga a la mitad de su valor original?

**Respuesta** Pudo haber empleado esferas conductoras idénticas y poner una esfera cargada en contacto con una neutra. Por simetría, cada esfera hubiera tenido la mitad de la carga original.

✓ El suplemento *Problem Solving* (Solución de problemas) ofrece una presentación extendida.

ley de Coulomb ➤



**Figura 10-9** Las fuerzas sobre dos objetos cargados tienen la misma magnitud y direcciones opuestas, de acuerdo con la tercera ley de Newton.

constante de Coulomb ➤

$$F = k \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

En esta ecuación,  $q_1$  y  $q_2$  representan la magnitud de la carga en los objetos 1 y 2,  $r$  es la distancia entre sus centros, y  $k$  es una constante (conocida como la constante de Coulomb) cuyo valor depende de las unidades elegidas para la fuerza, la carga y la distancia.

Cada objeto siente la fuerza producida por el otro. Las fuerzas son vectores y actúan sobre la línea entre los centros de los dos objetos. La fuerza en cada objeto se dirige hacia el otro si las cargas tienen signos opuestos, y se alejan entre sí si las cargas tienen el mismo signo (figura 10-9). Debido a que las dos fuerzas se deben a la interacción entre los dos objetos, las fuerzas son un par acción-atracción. De acuerdo con la tercera ley de Newton, las fuerzas son iguales en magnitud, apuntan en direcciones opuestas, y actúan sobre objetos diferentes.

Debido a que, hasta el siglo xx, se desconocía la existencia de una carga fundamental elemental, por conveniencia se eligió la unidad de la carga eléctrica, el coulomb (C), para los circuitos eléctricos. (Más adelante definiremos formalmente el coulomb.) Al emplear el coulomb como la unidad de la carga, mediante un experimento se determina que el valor de la constante de Coulomb es

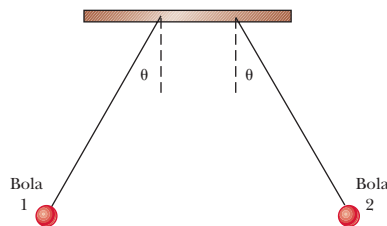
$$k = 9 \times 10^9 \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{C}^2}$$

El coulomb es una unidad muy grande para las situaciones que hemos analizado. Por ejemplo, la fuerza entre dos esferas, en donde cada una tiene 1 coulomb de carga y están separadas por 1 metro, es

$$F = k \frac{q_1 q_2}{r^2} = \left( 9 \times 10^9 \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{C}^2} \right) \frac{(1 \text{ C})(1 \text{ C})}{(1 \text{ m})^2} = 9 \times 10^9 \text{ N}$$

Ésta es una fuerza de 1 millón de toneladas.

Las cargas que hemos analizado son mucho menores. Cuando arrastra sus zapatos sobre una alfombra, las cargas transferidas son alrededor de una millonésima de un coulomb. Pero incluso esta carga es muy grande comparada con la de un solo electrón o un protón. Ahora se sabe que el tamaño de la carga en un electrón o un protón es  $1.6 \times 10^{-19}$  coulombs. A la inversa, se requeriría una carga en  $6.24 \times 10^{18}$  protones (o electrones) para igualar una carga de 1 coulomb.



**Figura 10-10**

## Razonamiento defectuoso



La pregunta siguiente aparece en el examen final: “Dos bolas metálicas pequeñas idénticas cuelgan una junto a la otra desde hilos de seda. Ambas bolas recibieron la misma carga neta, de modo que se repelen entre sí, como en la figura 10-10. Si la carga neta en la bola 2 se reduce a la mitad, ¿el ángulo que hace la bola 1 con la vertical será más pequeño, igual, o más grande que el ángulo que hace la bola 2 con la vertical?”

Peter ofrece la respuesta siguiente: “La bola 2 todavía colgará en el mismo ángulo que antes. La carga en la bola 1 no ha cambiado, de modo que ejerce la misma fuerza sobre la bola 2. La bola 2 tiene la mitad de la carga, de modo que ejerce la mitad de la fuerza sobre la bola 1. Por lo tanto, la bola 1 colgará en un ángulo más pequeño que la bola 2.” **¿Debe Peter recibir un reconocimiento por este problema?**

**Respuesta** La ley de Coulomb satisface automáticamente la tercera ley de Newton. La fuerza que ejerce la bola 2 sobre la bola 1 debe tener la misma magnitud (y la dirección opuesta) a la fuerza que ejerce la bola 1 sobre la bola 2. La reducción a la mitad de la carga en la bola 2 disminuirá a la mitad la fuerza percibida por *cada* bola. Ambas bolas cuelgan en el mismo ángulo más pequeño.

## Electricidad y gravedad

### ✓ MATEMÁTICAS

La forma matemática de la ley de Coulomb es igual que la ley de la gravitación universal analizada en el capítulo 4. Por lo tanto, el dibujo de la figura 4-2, que ejemplifica que depende de la ley del cuadrado inverso sobre la distancia, también vale para la electricidad si se reemplaza la Tierra con un objeto cargado. Sin embargo, hay varias diferencias importantes entre la gravedad y electricidad que controlan las reglas de estas dos fuerzas en el universo.

Existen dos tipos de carga eléctrica; positiva y negativa. Las cargas opuestas se atraen y las diferentes se repelen. Sin embargo, sólo hay un tipo de masa. No existe la masa negativa, y la fuerza gravitacional nunca es repulsiva. Debido a la distribución posible de una carga inducida con dos tipos de carga, los materiales conductores pueden blindar una región de todas las fuerzas eléctricas externas. Suponga que construimos una habitación metálica grande. Si esta habitación se colocara cerca de una carga eléctrica grande, las cargas en las paredes metálicas se redistribuirían de tal modo que cancelarían el efecto de la carga externa para todos los lugares en la habitación. La cancelación sólo funciona porque hay dos tipos de carga eléctrica. Este resultado no es posible para las fuerzas gravitacionales; no puede crearse una cámara libre de gravitación, porque no existe una masa negativa. Las naves espaciales antigraavedad, aunque son un buen material para los escritores de ciencia ficción, no son posibles.

Otra diferencia entre la electricidad y la gravedad estriba en el comportamiento de los objetos en los campos respectivos. La fuerza gravitacional es proporcional a la masa de un objeto y, por lo tanto, los objetos de todos tamaños y composiciones tienen la misma aceleración en un campo gravitacional. Por ejemplo, todos los objetos tienen la misma aceleración en caída libre cerca de la superficie de la Tierra. En contraste, la fuerza eléctrica es proporcional a la carga en un objeto y *no* a la masa del objeto. Por lo tanto, los objetos cargados tienen aceleraciones distintas en un campo eléctrico. Por ejemplo, si liberáramos un protón y un electrón cerca de un objeto cargado, el electrón tendría una aceleración mucho más grande. Las fuerzas en el electrón y el protón tienen el mismo tamaño, pero la masa del electrón es mucho más pequeña, lo cual produce una aceleración mucho más grande. En este caso, la aceleración sería en dirección opuesta, porque las cargas tienen signos opuestos.

Por último, todas las cargas ocurren como múltiplos enteros de un tamaño fijo. Los experimentos han demostrado que las cargas en los electrones y los protones tienen el mismo tamaño. Las cargas en las partículas subatómicas comunes son de



La jaula metálica protege al profesor Sprott de la descarga de alto voltaje.

Cortesía de © Prof. Clint Sprott, Universidad de Wisconsin-Madison



© Royalty-Free/Corbis

La fuerza eléctrica domina en la escala atómica, como en este cristal grande.



© NASA

La fuerza gravitacional domina en el Sistema Solar y más allá, como en esta galaxia.

este mismo tamaño o múltiplos enteros de este tamaño; las cargas pueden ser 2 o 3 veces la carga en el protón, pero nunca 1.5 veces esta carga. La masa también ocurre en grandes cantidades, pero hay muchos tamaños diferentes; por ejemplo, las masas del electrón, el protón y el neutrón. Éstas se pueden combinar en muchas maneras distintas y las masas totales no son múltiplos de una unidad de masa única.

Una consecuencia de estas diferencias son las distintas funciones que estas dos fuerzas desempeñan en nuestras vidas. La fuerza eléctrica es la fuerza dominante en el mundo atómico; determina las propiedades de los átomos y las moléculas. Por otra parte, la fuerza gravitacional domina en la escala macroscópica de las personas, los planetas y las galaxias. La razón de que la electricidad y la gravedad también funcionen en estos dos dominios es que los objetos macroscópicos esencialmente no están cargados; es decir, existen aproximadamente cantidades iguales de cargas positivas y negativas en casi todos los objetos grandes. Aunque es tremenda la fuerza atrayente total entre todas las cargas positivas en la Tierra y todas las cargas negativas en la Luna, es igual y opuesta a la fuerza repulsiva entre las cargas negativas en la Tierra y las cargas negativas en la Luna. La fuerza eléctrica neta es esencialmente cero debido a esta cancelación. Sin embargo, como sólo hay un tipo de masa, no hay nada para cancelar la mucho más débil fuerza gravitacional entre los átomos en la Tierra y los átomos en la Luna. De modo que cuando pasamos de las personas a los planetas y llegamos a las galaxias, la fuerza gravitacional se vuelve la fuerza dominante.

## SOLUCIÓN | Fuerzas gravitacional y eléctrica

✓ **MATEMÁTICAS**

Como ejemplo numérico, calculemos los tamaños de las fuerzas eléctrica y gravitacional entre un electrón y un protón en un átomo de hidrógeno. Suponemos primero que el electrón y el protón están separados por una distancia de  $5.29 \times 10^{-11} \text{ m}$  y empleamos las masas y las cargas conocidas del electrón y el protón. (Véase la tabla de datos físicos al final del libro.)

$$F_g = G \frac{m_1 m_2}{r^2} = \left( 6.67 \times 10^{-11} \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{kg}^2} \right) \frac{(9.11 \times 10^{-31} \text{ kg})(1.673 \times 10^{-27} \text{ kg})}{(5.29 \times 10^{-11} \text{ m})^2}$$

$$= 3.63 \times 10^{-47} \text{ N}$$

$$F_e = k \frac{q_1 q_2}{r^2} = \left( 9 \times 10^9 \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{C}^2} \right) \frac{(1.6 \times 10^{-19} \text{ C})^2}{(5.29 \times 10^{-11} \text{ m})^2} 8.23 \times 10^{-8} \text{ N}$$

Por lo tanto, la fuerza eléctrica es más de  $10^{39}$  veces la intensidad de la fuerza gravitacional. (Eso es ¡mil sextillones de veces más grande!) Debido a que las dos fuerzas cambian de la misma manera cuando se modifica la separación del electrón y el protón, la separación no importa y la fuerza eléctrica siempre es así de más intensa.

## El campo eléctrico

✓ **MATEMÁTICAS**

De manera implícita, hemos supuesto que la fuerza entre dos cargas es el resultado de algún tipo de interacción directa: una especie de interacción a distancia. Este tipo de interacción es un poco inquietante porque no hay un mecanismo directo de impulso o atracción en el espacio interpuesto. Los efectos eléctricos son evidentes incluso en situaciones en las cuales existe un vacío entre las cargas.

En muchos casos, se comprueba que, en lo conceptual y computacional, es más sencillo separar en dos pasos distintos la interacción eléctrica que un objeto siente como resultado de otro. En primer lugar, uno de los objetos genera, en virtud de su carga, un **campo eléctrico** en cada punto en el espacio. En segundo lugar, otro objeto interactúa, en virtud de su carga, con el campo eléctrico para experimentar la fuerza. Las cargas eléctricas crean el campo eléctrico y ejercen fuerzas

sobre otras cargas eléctricas. Este método es similar al que aplicamos con la fuerza gravitacional casi al final del capítulo 4.

Si éste fuera el único propósito de la idea del campo, desempeñaría una función menor en nuestra visión del mundo de la física. De hecho, es probable que parezca que cambiamos una idea inquietante por otra. Sin embargo, cuando continuemos nuestros estudios, encontraremos que el campo eléctrico adopta una identidad propia. Como veremos en el capítulo 12, los campos eléctrico y magnético viajan por el espacio como ondas.

Definimos el campo eléctrico  $\mathbf{E}$ , en cada punto en el espacio, como la fuerza ejercida sobre una carga positiva unitaria colocada en ese punto. Esto equivale al modo en que se definió el campo gravitacional, con la unidad de masa reemplazada por una carga positiva unitaria.

Debido a que la fuerza es una cantidad vectorial, el campo eléctrico es un campo de vector; tiene una magnitud y una dirección en cada punto en el espacio. Puede imaginar el espacio que rodea una carga positiva como un puerco espín de pequeñas flechas que apuntan hacia fuera, como en la figura 10-11. Las flechas más alejadas de la carga son más cortas para indicar que la fuerza es más débil ahí.

**Pregunta** ¿A qué se asemeja el campo eléctrico que rodea una carga negativa?

**Respuesta** Un campo eléctrico que rodea una carga negativa se ve igual que un campo eléctrico que rodea una carga positiva, excepto que todas las flechas están invertidas.

Los valores para un campo eléctrico real se miden con una carga de prueba. La unidad de carga que se ha utilizado es 1 coulomb. Ésta es una cantidad de carga muy grande, y si en realidad utilizáramos 1 coulomb como la carga de prueba, lo más probable es que moviera las cargas que generaron el campo, con lo cual perturbaría el campo. Por lo tanto, empleamos una carga mucho más pequeña, como 1 microcoulomb, y obtenemos el tamaño del campo al dividir la fuerza medida  $\mathbf{F}$  entre el tamaño  $q$  de la carga de prueba:

$$\mathbf{E} = \frac{\mathbf{F}}{q}$$

Observe que las unidades de un campo eléctrico son newtons por coulomb (N/C).

Si conocemos los tamaños y las ubicaciones de las cargas que crean el campo eléctrico, también podemos calcular el valor del campo en cualquier punto de interés, al suponer que colocamos una carga de 1 coulomb en el lugar, y calculamos la fuerza de esta carga mediante la ley de Coulomb. Al hacer esto, podemos aprovechar el hecho de que cada carga actúa de modo independiente; los efectos simplemente se suman. Esto significa que hemos calculado la contribución de cada carga del campo y después sumamos estas contribuciones de manera vectorial.

Una vez que conocemos el valor del campo eléctrico en cualquier punto, podemos calcular la fuerza que experimentaría cualquier carga  $q$  si se colocara en ese punto:

$$\mathbf{F} = q\mathbf{E}$$

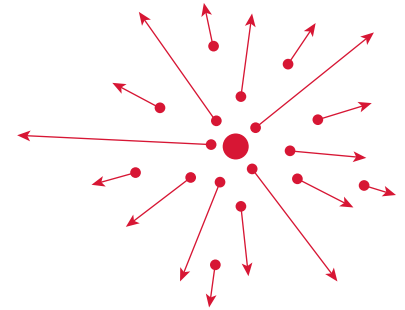
Esto se lee: “La fuerza de un objeto es igual a la carga neta  $q$  sobre el objeto por el campo eléctrico  $\mathbf{E}$  en el lugar del objeto.”

Como ejemplo, supongamos que hemos generado un campo eléctrico uniforme que apunta hacia abajo y tiene una magnitud de 1000 newtons por coulomb. Si colocamos un objeto en este campo que tenga una carga positiva de 1 microcoulomb, el objeto experimentará una fuerza hacia debajo de

$$F = qE = (10^{-6} \text{ C}) \left( 10^3 \frac{\text{N}}{\text{C}} \right) = 10^{-3} \text{ N}$$

Si cambiamos la carga sobre el objeto, es muy fácil calcular la fuerza nueva; no tenemos que abordar las cargas que produjeron el campo eléctrico.

◀ campo eléctrico = fuerza sobre una carga positiva unitaria



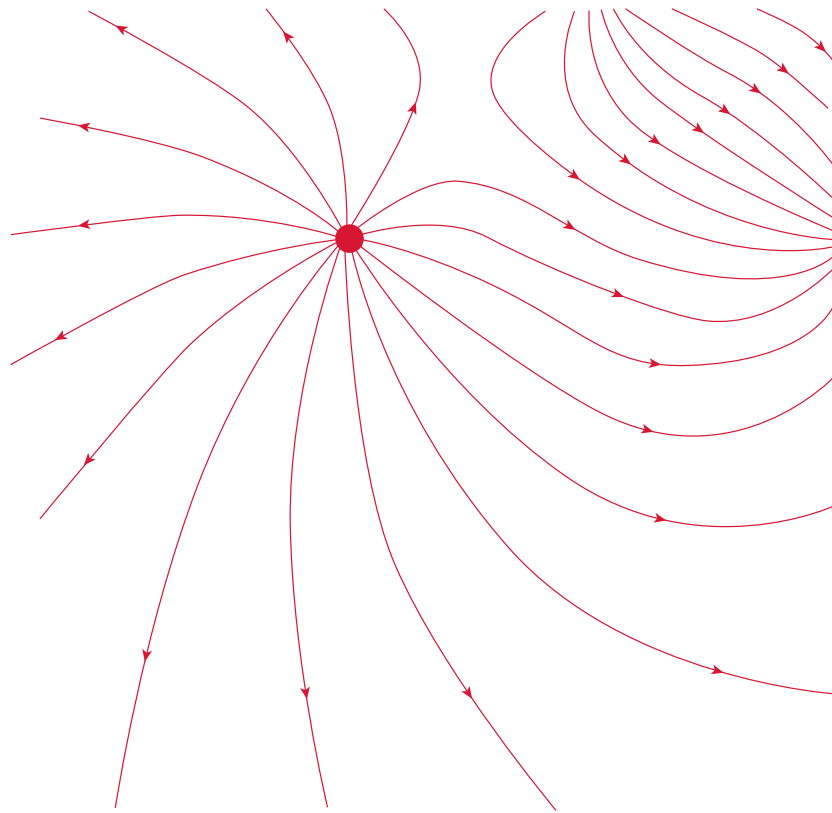
**Figura 10-11** Vectores de ejemplo de un campo eléctrico alrededor de una carga fuente positiva.

◀ campo eléctrico =  $\frac{\text{fuerza}}{\text{carga}}$

◀ fuerza eléctrica = carga  $\times$  campo eléctrico



**Figura 10-12** Las líneas del campo eléctrico representan el campo eléctrico total en una región del espacio.

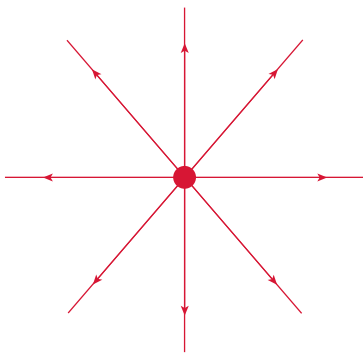


## Líneas del campo eléctrico

Si sólo nos interesa lo que ocurre en un punto único, es muy útil la representación del campo eléctrico. Sin embargo, se vuelve complicada si nos interesa una región del espacio, porque cada punto en el espacio puede tener un vector de campo eléctrico diferente asociado con él. Para dibujar esto, necesitaríamos dibujar un vector distinto (posiblemente diferente en magnitud y en dirección) en cada punto y éstos tenderían a superponerse. Para manejar esto, presentamos una representación alterna que emplea las **líneas del campo eléctrico**.

Imagine una región que contiene partículas cargadas fijas en un lugar y que crean un campo eléctrico en cada punto de la región. Ahora dibujamos una línea del campo eléctrico. Encuentre la dirección del campo eléctrico en un punto inicial y avance un pequeño paso en la dirección de este vector. En el punto nuevo, encuentre de nuevo la dirección del campo eléctrico y avance un paso pequeño en esta dirección. La continuación de este proceso crea una serie de puntos que conectamos con una línea uniforme. Ésta es una línea del campo eléctrico. El paso final es poner una pequeña flecha en la línea para indicar la dirección del viaje. El comienzo en un punto nuevo en esta región conduce a una nueva línea del campo eléctrico. Si hacemos esto desde suficientes puntos iniciales diferentes, obtenemos un ejemplo de las líneas por toda la región, como se aprecia en la figura 10-12.

Esto suena como un proceso largo y complicado; y lo es. Las buenas noticias es que a menudo aprendemos mucho mediante los diagramas cualitativos de las líneas de un campo eléctrico, lo cual es mucho más fácil que hacer los cálculos detallados. Podemos emplear nuestra intuición para dibujar las líneas de un campo eléctrico que rodean una carga aislada de una fuente positiva. Una carga de prueba positiva se repelería directamente de la carga fuente positiva, de modo que las líneas del campo eléctrico deben comenzar en la carga fuente y continuar de manera radial hacia fuera hasta el infinito, igual que la figura 10-13. En tal caso, el vector del campo eléctrico en cualquier punto en el espacio es tangente a la línea del campo eléctrico que atravesaría ese punto. Esto coincide con el dibujo de la figura 10-11 de los vectores del campo eléctrico para una carga fuente positiva. (Si



**Figura 10-13** Las líneas del campo eléctrico producidas por una carga aislada de una fuente positiva.

nos interesa un punto que no está sobre una de las líneas del campo eléctrico que hemos dibujado, podemos determinar la dirección aproximada de una línea que atraviesa ese punto al analizar las líneas circundantes.)

Observe que las líneas del campo eléctrico de la figura 10-13 comienzan en lugares equidistantes alrededor de la carga fuente. Cuando se dibujan de esta manera las líneas del campo eléctrico, nos ofrecen información visual acerca de la magnitud del vector del campo eléctrico en cualquier punto. Observe que las líneas del campo eléctrico están cercanas entre sí cerca de la carga fuente, en donde el campo eléctrico es intenso, y las líneas del campo están alejadas entre sí en los lugares alejados de la carga fuente, en donde el campo eléctrico es débil. En realidad, cualquier punto en el espacio que está a 3 centímetros de la carga fuente debe tener el mismo campo eléctrico. La simetría esférica de nuestras líneas del campo asegura que el espaciamiento entre las líneas del campo adyacentes sea igual para todos estos puntos. En general, la intensidad del campo eléctrico (es decir, la longitud del vector) es mayor en las regiones donde las líneas del campo eléctrico están más cercanas. Otro modo de decir esto es que el campo eléctrico es proporcional a la densidad de las líneas del campo eléctrico.

---

**Pregunta** ¿Cómo cambiaría el diagrama de la figura 10-13 si la carga fuente positiva se reemplazara con una carga fuente negativa?

---

**Respuesta** Las flechas en el diagrama apuntarían en direcciones opuestas.

---

Cuando está presente más de una carga fuente en una región, las líneas del campo representan el campo eléctrico total en la región producido por todas las cargas fuente. En los lugares muy cercanos a una de las cargas fuente, las líneas del campo eléctrico todavía deben ser radialmente simétricas respecto a la carga fuente (porque su contribución dominará). El número de líneas del campo que se originan en una carga fuente positiva o terminan en una carga fuente negativa debe ser proporcional a la magnitud de la carga. En otras palabras, la intensidad del campo eléctrico en un lugar a 1 centímetro de una carga fuente de +2 coulombs debe ser el doble de grande que la intensidad de un campo eléctrico a 1 centímetro de una carga fuente de +1 coulomb. La figura 10-14 presenta las líneas del campo eléctrico alrededor de dos cargas fuente, una positiva y una negativa.

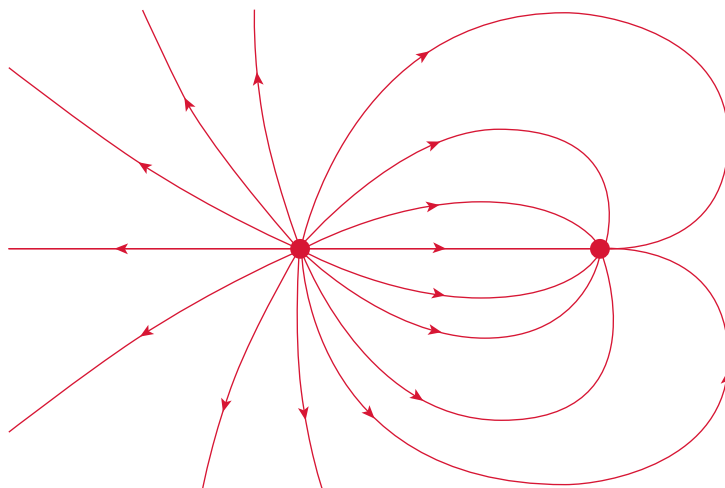
---

**Pregunta** Si la carga fuente positiva de la figura 10-14 tiene una carga de +6 microcoulombs, ¿cuál es la magnitud de la carga en la carga fuente negativa?

---

**Respuesta** El número de líneas del campo eléctrico que se originan en una carga positiva o terminan en una carga negativa es proporcional al tamaño de la carga eléctrica.

---



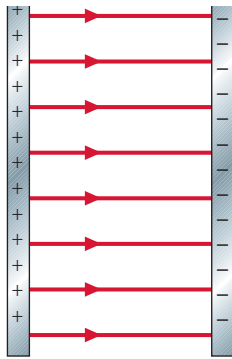
**Figura 10-14** Las líneas del campo eléctrico indican que la magnitud de la carga positiva es el doble de la de la carga negativa.

Dieciséis líneas del campo salen de la carga fuente positiva, pero sólo ocho de esas líneas del campo terminan en la carga fuente negativa. El tamaño de la carga negativa debe ser la mitad del tamaño de la carga positiva. Debe tener una carga de  $-3$  microcoulombs.

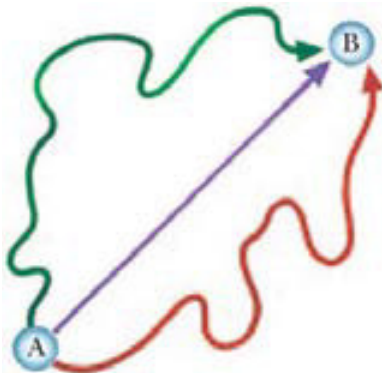
Observe que las líneas del campo eléctrico siempre inician en cargas positivas y terminan en cargas negativas. Si la región que considera contiene más cargas positivas que negativas, algunas líneas saldrán de la región. Si la región contiene más cargas negativas, algunas líneas entrarán del exterior de la región.

**Pregunta** ¿Por qué las líneas del campo eléctrico nunca se cruzan?

**Respuesta** Las líneas del campo eléctrico representan el campo eléctrico total en una región producido por todas las cargas fuente. El vector del campo eléctrico en cualquier punto en el espacio es tangente a la línea del campo eléctrico que atraviesa ese punto. Si dos líneas del campo eléctrico se cruzaran en algún punto, el campo eléctrico en ese punto tendría que ser tangente a ambas líneas del campo eléctrico. Tendría que apuntar en dos direcciones en un solo lugar. Esto no es posible.



**Figura 10-15** Las líneas del campo eléctrico entre placas de metal cargadas indican que el campo eléctrico es uniforme entre las placas.



**Figura 10-16** El trabajo efectuado al llevar una carga de A a B no depende de la trayectoria.

energía eléctrica potencial = trabajo ➤  
desde un punto de referencia

Una situación muy común en donde las líneas del campo eléctrico aportan una percepción física es el caso de las placas de metal paralelas cargadas. Si se toman electrones de una placa metálica y se colocan en la otra, ambas placas terminan con la misma cantidad de exceso de carga eléctrica (positiva en una placa y negativa en la otra). La carga se dispersará en las superficies enfrentadas de las placas, hasta que la densidad de la carga sea uniforme. Las líneas del campo eléctrico se originan en la carga positiva y terminan en la carga negativa, de modo que la distribución uniforme de la carga en las placas dicta que las líneas del campo eléctrico entre las placas sean paralelas entre sí, perpendiculares a las placas, y uniformemente espaciadas, como en la figura 10-15.

Estas líneas del campo eléctrico son muy sencillas, y representan un campo eléctrico cuya intensidad es uniforme en cualquier lugar entre las dos placas. La sencillez de las líneas del campo eléctrico predice un resultado que es contrario al sentido común: si pone una carga de prueba positiva pequeña en un lugar a la mitad entre las placas, experimenta el mismo campo eléctrico (y, por lo tanto, la misma fuerza eléctrica) de lo que percibiría si estuviera muy cercana a la placa positiva (o, de hecho, en cualquier otro lugar entre las placas). Es posible demostrar matemáticamente que, en realidad, esto es lo que sucede, pero es mucho más fácil usar el concepto de las líneas del campo eléctrico.

## Potencial eléctrico

✓ **MATEMÁTICAS**

Debemos efectuar un trabajo para elevar un bloque de 1 kilogramo en el campo gravitacional de la Tierra, y este trabajo aumenta la energía gravitacional potencial del bloque. Cuando se suelta el bloque, cae y la energía gravitacional potencial cambia a energía cinética. Elevar la misma distancia un bloque de 5 kilogramos requiere cinco veces ese trabajo y el bloque gana cinco veces la energía gravitacional potencial. En otras palabras, conocer la energía que adquiere un bloque de 1 kilogramo nos permite calcular la energía que adquiriría cualquier otra masa que se moviera entre los dos puntos.

De la misma manera, se requiere un trabajo para mover una partícula cargada en un campo eléctrico, y este trabajo cambia la **energía eléctrica potencial** de la partícula. Cuando soltamos la partícula, esta energía eléctrica potencial se convierte a energía cinética. Por lo tanto, definimos la energía eléctrica potencial del mismo modo que lo hicimos para la gravedad. La energía eléctrica potencial de un objeto cargado es igual al trabajo realizado al llevar el objeto de un punto de referencia cero al lugar del objeto. Igual que con la energía gravitacional potencial, el valor de la energía eléctrica potencial no depende de la trayectoria, sino

## Relámpago

Todos han visto un relámpago (figura A) y es probable que en algún momento hayan sentido temor por este espectacular despliegue de energía. Un relámpago es impredecible y parece ocurrir de manera aleatoria e instantánea. Todo, excepto el trueno, suele transcurrir en menos de medio segundo. No obstante, los efectos son importantes: cada año los relámpagos provocan 80 millones de dólares en daños en Estados Unidos. En promedio, los relámpagos matan 85 personas al año y lesionan a otras 250 sólo en Estados Unidos.

Todavía tenemos mucho que aprender de los relámpagos. Por ejemplo, no sabemos qué provoca la acumulación inicial de una carga, qué determina las trayectorias que siguen los relámpagos, o qué los activa.

Sabemos que, durante una tormenta, las nubes generan una separación de la carga eléctrica, en donde la parte superior de las nubes se carga positivamente y la parte inferior se carga negativamente, como se indica en la figura B. La producción de un relámpago comienza cuando la carga negativa en la parte inferior de la nube se hace lo bastante grande para superar la resistencia del aire al flujo de electricidad (figura C) y los electrones comienzan a fluir hacia la Tierra sobre una trayectoria bifurcada en zigzag a unas 60 millas por segundo. Cuando los electrones fluyen hacia abajo, chocan con las moléculas del aire y las ionizan, produciendo más electrones libres. Aunque la corriente puede tener una magnitud de 1000 amperes, éste no es el relámpago que vemos.

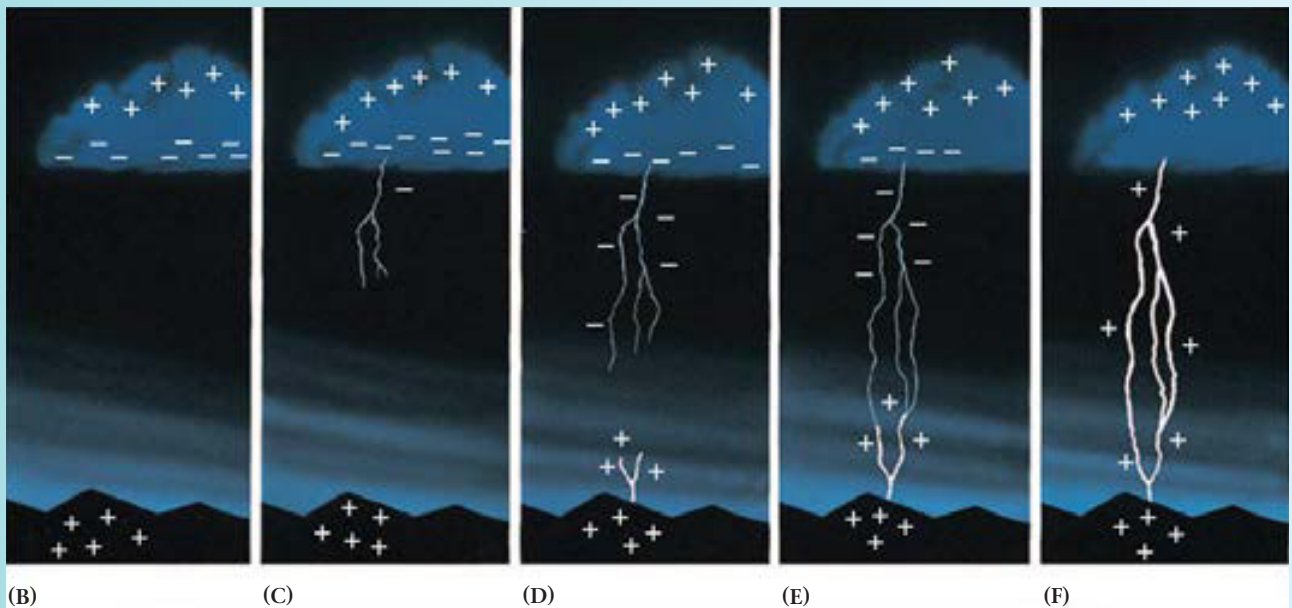
Mientras tanto, cuando los electrones se acercan a la tierra, ésta se carga positivamente cada vez más, debido a la repulsión de los electrones en la tierra. Esta región cargada positivamente asciende a través de los objetos conductores en la tierra —casas, árboles y personas— hacia el aire (figura D). Cuando los electrones que se mueven hacia abajo alcanzan las regiones positivas que fluyen hacia arriba a una altitud aproximada de 100 metros, forman un circuito com-



© James Horn/Dreamstime

**Figura A** Los relámpagos generan corrientes hasta de 200 000 amperes.

pleto (figura E), y comienza el relámpago. En menos de 1 milisegundo, hasta 1000 billones de electrones pueden llegar a tierra; la corriente puede tener una magnitud de 200 000 amperes. Aunque el flujo de la carga es hacia abajo, el punto de contacto entre la carga de la nube y la carga de la tierra fluya hacia arriba a aproximadamente 50 000 millas por segundo. (Los observadores informan que el relámpago se mueve hacia abajo porque la trayectoria que está iluminada es la ruta bifurcada inicial que viene de la nube.) La onda irruptiva hacia arriba calienta el aire a 50 000°F. Un metro de la trayectoria del relámpago puede destellar con un brillo de 1 millón de bombillos de 100 watts (figura F). Este rápido calentamiento del aire sobre la trayectoria del relámpago también produce una onda de impacto que escuchamos como el trueno. Lo que vemos como un solo relámpago suelen ser varios relámpagos en rápida sucesión sobre la misma trayectoria.



**Figura B** El desarrollo de un relámpago.

de la ubicación de la referencia, la ubicación del objeto, y la carga sobre el objeto (figura 10-16).

Como con la energía gravitacional potencial, el valor real de la energía eléctrica potencial no es importante en los problemas físicos; lo que importa es sólo la diferencia en la energía entre los puntos. Si se requieren 10 joules de trabajo para mover un objeto cargado del punto A al punto B, la energía eléctrica potencial del objeto en el punto B es 10 joules más alta que en el punto A. Si el punto A es el punto de referencia cero, la energía eléctrica potencial del objeto en el punto B es 10 joules.

Debido a que los objetos con cargas diferentes tienen energías eléctricas potenciales distintas en un punto específico, suele ser más conveniente hablar de la energía disponible producida por un campo eléctrico, sin referencia a un objeto cargado específico. El **potencial eléctrico**  $V$  en cada punto de un campo eléctrico se define como la energía eléctrica potencial  $EPE$  dividida entre la carga  $q$  del objeto:

$$\text{potencial eléctrico} = \frac{\text{energía eléctrica potencial}}{\text{carga}} \rightarrow$$

$$V = \frac{EPE}{q}$$

Observe que no importa cuál objeto cargado utilizamos para definir el potencial eléctrico. Esta cantidad es numéricamente igual al trabajo requerido para llevar una carga de prueba positiva de 1 coulomb desde el punto de referencia cero al punto especificado. Las unidades para el potencial eléctrico son joules por coulomb (J/C), una combinación conocida como **volt** (V). Por esta razón, solemos referirnos al potencial eléctrico como un *voltaje*.

La definición del potencial eléctrico nos permite obtener la energía eléctrica potencial para cualquier objeto cargado al multiplicar el potencial por la carga. Una vez más, lo único que importa es la *diferencia de potencial*. Por ejemplo, una batería de 12 volts tiene una diferencia eléctrica potencial de 12 volts entre sus dos terminales. Esto significa que 1 coulomb que se mueve de una terminal a la otra ganaría o perdería  $(1 \text{ coulomb})(12 \text{ volts}) = 12 \text{ joules}$  de energía.

---

**Pregunta** ¿Cuánto trabajo se requiere para mover 3 coulombs de carga positiva desde la terminal negativa de una batería de 12 volts a la terminal positiva?

---

**Respuesta** Cada coulomb exige 12 joules de trabajo, de modo que 3 coulombs requieren 36 joules:  $W = qV = (3 \text{ coulombs})(12 \text{ volts}) = 36 \text{ joules}$ .

---

Si es alta la diferencia de potencial, o el voltaje, entre dos puntos, y los puntos están cercanos, el campo eléctrico puede ser lo bastante intenso para arrancar los electrones de las moléculas en el aire. Los electrones son atraídos en una dirección, y los iones positivos restantes son atraídos en la otra. Debido a que los electrones tienen mucha menos masa que los iones, pronto aceleran a altas velocidades. Cuando aceleran, chocan con otras moléculas, con lo cual arrancan electrones adicionales. Esto forma una cascada de electrones que denominamos una *chispa*. El aire seco se descompone de esta manera cuando el campo eléctrico alcanza unos 30 000 volts por centímetro.

### FÍSICA | HÁGALO USTED MISMO

La siguiente ocasión que el clima esté seco y usted produzca chispas al tocar los pomos de las puertas, sostenga una llave en su mano cuando toque objetos metálicos. ¿Por qué le duele menos? Calcule su potencial eléctrico al estimar la extensión de las chispas.

## Resumen

Los objetos se cargan o descargan eléctricamente mediante la transferencia de cargas. Un objeto cargado tiene cantidades iguales de cargas positivas y negativas. Los objetos cargados positivamente tienen un exceso de cargas positivas o una



deficiencia de cargas negativas. En un sistema aislado, se conserva la carga total. Las cargas pueden fluir por los conductores, como alambres metálicos, pero no a través de los aislantes, como los hilos de seda.

En la electricidad, a diferencia de la gravedad, hay dos tipos diferentes de cargas, y la dirección de la fuerza depende de los tipos relativos de las cargas. Cargas iguales se repelen; cargas distintas se atraen. Un objeto cargado puede atraer un objeto no cargado debido a una separación de cargas inducida.

La fuerza eléctrica tiene la misma forma matemática que la fuerza gravitacional. Sin embargo, la fuerza eléctrica puede ser repulsiva, al igual que atrayente. La carga eléctrica viene en múltiplos enteros de un tamaño fijo. Las cargas eléctricas en los electrones y los protones tienen la misma magnitud, pero signos opuestos.

Las cargas eléctricas están rodeadas por un campo eléctrico que es igual a la fuerza experimentada por una carga positiva unitaria. Este campo eléctrico es un vector con una magnitud y una dirección en cada punto en el espacio. Las unidades para el campo eléctrico son newtons por coulomb. Las líneas del campo eléctrico representan el campo eléctrico en una región del espacio. El campo eléctrico en cualquier ubicación apunta en una dirección tangente a la línea del campo en esa ubicación, y la intensidad del campo eléctrico es proporcional a la densidad local de las líneas del campo eléctrico.

La energía eléctrica potencial de un objeto cargado en un campo eléctrico es igual al trabajo realizado para llevar el objeto desde cierta ubicación de referencia cero. En las situaciones físicas, sólo importan las diferencias en la energía eléctrica potencial. El potencial eléctrico es igual a la energía eléctrica potencial dividida entre la carga del objeto. Esta cantidad es numéricamente igual al trabajo requerido para llevar una carga de prueba positiva de 1 coulomb desde el punto de referencia cero. Las unidades para el potencial eléctrico son joules por coulomb, o volts.

## Capítulo 10



## Revisión

Ocurren chispas cuando el campo eléctrico se hace lo bastante fuerte para atraer los electrones de los átomos. El campo eléctrico acelera estos electrones y obtiene suficiente energía cinética para arrancar los electrones de otros átomos. Esta avalancha de electrones produce las chispas que observamos. Los campos eléctricos de 30 000 volts por centímetro son lo bastante fuertes para arrancar los átomos en el aire seco. Debido a que el campo eléctrico es proporcional a la diferencia del potencial eléctrico e inversamente proporcional a la distancia, se requieren voltajes grandes para producir chispas extensas.

## TÉRMINOS IMPORTANTES

**aislante:** Un material que no permite el paso de una carga eléctrica. Los materiales cerámicos son buenos aislantes.

**aterizar:** El establecimiento de una conexión eléctrica hacia la tierra para neutralizar un objeto.

**campo eléctrico:** El espacio que rodea a un objeto cargado, en donde se asigna a cada ubicación un valor igual a la fuerza experimentada por una unidad de carga positiva colocada en esa ubicación; se mide en newtons por coulomb.

**carga:** Una propiedad de las partículas elementales que determina la intensidad de su fuerza eléctrica con otras partículas que poseen una carga. Se mide en coulombs, o en múltiplos enteros de la carga en el protón.

**cargado:** Que posee una carga neta negativa o positiva.

**conductor:** Un material que permite el paso de una carga eléctrica. Los metales son buenos conductores.

**conservación de la carga:** En un sistema aislado, la carga total se conserva.

**coulomb:** La unidad de carga eléctrica en el Sistema Internacional; la carga de  $6.24 \times 10^{18}$  protones.

**energía eléctrica potencial:** El trabajo realizado para llevar un objeto cargado desde una ubicación de referencia cero a un punto específico en el espacio; se mide en joules.

**líneas del campo eléctrico:** Una representación del campo eléctrico en una región del espacio. El campo eléctrico es tangente a la línea del campo en cualquier punto y su magnitud es proporcional a la densidad local de las líneas del campo.

**potencial eléctrico:** La energía eléctrica potencial dividida entre la carga de un objeto; el trabajo realizado para llevar una carga de prueba positiva de 1 coulomb desde una ubicación de referencia

cero a un punto específico en el espacio; se mide en joules por coulomb, o volts.

**relación cuadrada inversa:** Una relación en la cual una cantidad se relaciona con el recíproco del cuadrado de una segunda cantidad;

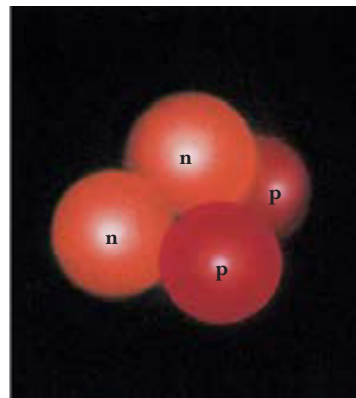
la fuerza eléctrica es proporcional al cuadrado inverso de la distancia desde la carga.

**volt:** La unidad del potencial eléctrico en el Sistema Internacional, 1 joules por coulomb.

## PREGUNTAS CONCEPTUALES

- Una barra de vidrio portátil se carga al frotarla con una bolsa de seda o de plástico mientras la sostiene en sus manos. A partir de esto, ¿concluiría que el vidrio es un conductor o un aislante? ¿Por qué?
- Los maestros de física inexpertos a menudo demuestran el uso del electroscope al tocarlo con una barra de vidrio cargada en un solo punto. Los maestros más experimentados suelen arrastrar toda la barra sobre la parte superior del electroscope para aumentar el efecto deseado. ¿Por qué es útil esto?
- ¿Por qué no es posible cargar sólo un extremo de una varilla metálica?
- ¿Puede utilizar piel para cargar una varilla metálica que sostiene en su mano desnuda? Explique.
- ¿Por qué es más fácil cargar un globo en un día seco que en un día húmedo?
- ¿Por qué es más fácil demostrar los fenómenos electrostáticos en Fairbanks, Alaska, que en Honolulu, Hawai?
- Antes que un avión se abastezca de combustible desde un camión, se conecta un cable desde el camión al avión. ¿Por qué?
- ¿Por qué a veces las prendas se pegan entre sí cuando se sacan de una secadora?
- Si una barra de hule se carga con piel y otra con plástico, se atraen entre sí. ¿Cómo explica esto?
- Emplea un pedazo de seda para cargar una barra de vidrio. ¿Esto deja la seda con una carga positiva o negativa? Explique.
- Cuando frota globos con lana y los pone cerca de pedazos de papel, encuentra tres categorías de comportamiento. Los globos atraen la lana y los pedazos de papel, pero repelen otros globos. Los pedazos de lana atraen los globos y los pedazos de papel, pero repelen otros pedazos de lana. Los globos y los pedazos de lana atraen los pedazos de papel, pero éstos no reaccionan con otros pedazos de papel. Cuando tenemos tres comportamientos distintos, ¿por qué sólo necesitamos dos tipos de carga en nuestro modelo?
- ¿Cómo sabría si descubrió un tercer tipo de carga? ¿Cuáles otros objetos esperaría que atrajera y repeliera el tercer tipo de carga?
- Su compañero afirma que los imanes en realidad sólo son barras cargadas con cargas opuestas en los dos extremos. ¿Cuál experimento efectuaría para convencer a su compañero de lo contrario?
- Encuentra que una barra de vidrio cargada atrae el polo norte de un imán en barra. Después descubre que la misma barra también atrae el polo sur del imán. Si le acerca una barra de hule cargada, ¿el polo norte será atraído, repelido, o no experimentará ninguna fuerza? Explique.
- Usted tiene tres bolas pequeñas, y cada una cuelga de un hilo aislante. Encuentra que las bolas 1 y 2 se repelen entre sí, y que las bolas 2 y 3 se repelen entre sí. ¿Las bolas 1 y 3 se atraerán o se repelerán entre sí? Explique.

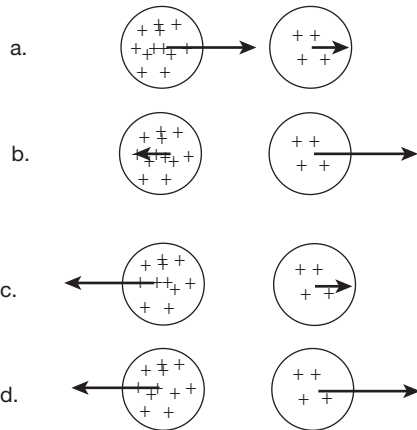
- Usted tiene tres bolas pequeñas, y cada una cuelga de un hilo aislante. Encuentra que las bolas 1 y 2 se atraen entre sí, y que las bolas 1 y 3 se atraen entre sí. Si acerca las bolas 2 y 3, ¿cuáles son los resultados posibles?
- El núcleo de un átomo de helio contiene dos protones y dos neutrones no cargados. Si dos electrones rodean el núcleo, ¿cuál es la carga total del átomo?



- En la visión moderna de la electricidad, ¿un objeto con una carga negativa tiene un exceso de carga positiva, un exceso de carga negativa, una deficiencia de carga negativa, o una deficiencia de carga positiva? Explique.
- Describa cómo un globo cargado se pega a una pared.
- Cuando se acerca un peine cargado a pedazos de papel, el peine primero atrae los pedazos, y los repele después que entran en contacto con él. Describa cómo se modifican las cargas en el peine y en los pedazos de papel durante este proceso.
- ¿Por qué los objetos cargados negativa y positivamente atraen los objetos neutros?
- Describa cómo una barra cargada negativamente atrae: (a) un objeto conductor no cargado, y (b) un objeto aislante no cargado.
- ¿Cómo puede utilizar un electroscope con una carga positiva conocida para determinar el signo de una barra cargada?
- ¿Cómo puede emplear una barra cargada negativamente para determinar si un electroscope cargado tiene una carga negativa o una positiva, sin modificar la carga en el electroscope?
- Describa cómo puede emplear una barra cargada negativamente para poner una carga negativa en un electroscope.
- Describa cómo utilizaría una barra cargada negativamente para dar a un electroscope una carga positiva.
- Al principio un electroscope tiene una carga negativa neta. ¿Por qué las hojas se juntan y permanecen juntas cuando la mano de una persona toca el electroscope?
- Al principio un electroscope recibe una carga positiva neta. Usted encuentra que, cuando acerca su mano a la

parte superior del electroscopio, sin tocarlo, las hojas se acercan ligeramente. Cuando retira su mano, se separan. ¿Cómo explica esto?

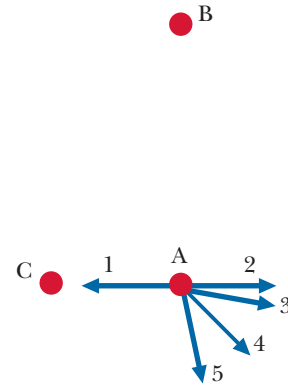
- ▲ 29. Tiene dos esferas metálicas sobre bases aislantes. Acerca cada una a la bola de un electroscopio cargado negativamente y encuentra que la esfera A hace que aumente la desviación, mientras que la esfera B hace que disminuya. ¿Qué puede decir acerca de la carga neta en cada esfera metálica?
- ▲ 30. Sostiene una barra de hule cargada cerca de la bola de un electroscopio y luego toca brevemente la bola con su dedo. Después de quitar la barra de hule, acerca una barra de vidrio cargada a la bola. ¿La desviación de las hojas aumenta, disminuye o se mantiene igual? ¿Por qué?
- ▲ 31. Cuando Coulomb desarrollaba su ley, no tenía un instrumento para medir una carga. No obstante, fue capaz de obtener esferas con  $\frac{1}{2}$ ,  $\frac{1}{3}$ ,  $\frac{1}{4}$ , ... de cierta carga original. ¿Cómo pudo haber utilizado un conjunto de esferas idénticas para hacer esto?
- ▲ 32. Tiene tres esferas metálicas idénticas sobre bases aislantes. Las esferas contienen cargas  $Q_A = -2q$ ,  $Q_B = -q$  y  $Q_C = 4q$ . Primero, la esfera A se pone en contacto con la esfera C y se separan. Después, la esfera C se pone en contacto con la esfera B y se separan. ¿Cuál es la carga resultante en la esfera B?
33. Dos esferas aislantes cargadas de manera uniforme se sostienen sobre postes fijos. La carga en una de las esferas es tres veces la carga en la otra. ¿Cuál diagrama representa de manera correcta la magnitud y la dirección de las fuerzas eléctricas en las dos esferas? Explique su respuesta.



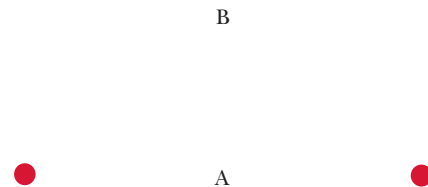
34. Tiene objetos cargados positivamente. El objeto B tiene el doble de la carga del objeto A. Cuando se acercan, el objeto A experimenta una fuerza eléctrica de 10 newtons. ¿La fuerza eléctrica que experimenta el objeto B es mayor, igual, o menor que 10 newtons? Explique.
35. Suponga que tiene dos objetos cargados de manera idéntica, separados por cierta distancia. ¿Cómo cambiaría la fuerza si los objetos estuvieran separados por el triple de la distancia?
36. Dos objetos cargados están muy lejos de cualquier otra carga. Si la distancia entre ellos se reduce a la mitad de su valor original, ¿qué le ocurre a la fuerza eléctrica entre las cargas?
37. Suponga que tiene dos objetos cargados de manera idéntica, separados por cierta distancia. ¿Cómo cambiaría la

fuerza si un objeto tuviera el triple de la carga y el otro mantuviera la misma carga?

38. Dos objetos cargados están muy lejos de cualquier otra carga. Si se duplica la carga en cada objeto, ¿qué le ocurre a la fuerza eléctrica entre los objetos?
39. Tres cargas idénticas están organizadas igual que en la figura. La distancia de A a B es el doble de la distancia de A a C. ¿Cuáles vectores representan mejor la fuerza en la carga A debida a B y C? Justifique su respuesta.



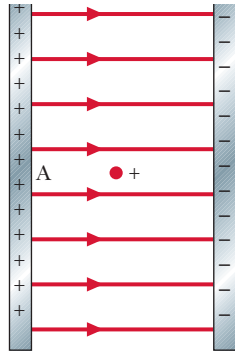
40. Dos cargas idénticas están fijas en los lugares indicados en la figura. Una tercera carga, idéntica a las otras dos, se pone primero en la posición A y después en la posición B. Para cada caso, determine la dirección de la fuerza eléctrica neta sobre la tercera carga. Si la fuerza es cero, declare eso explícitamente.



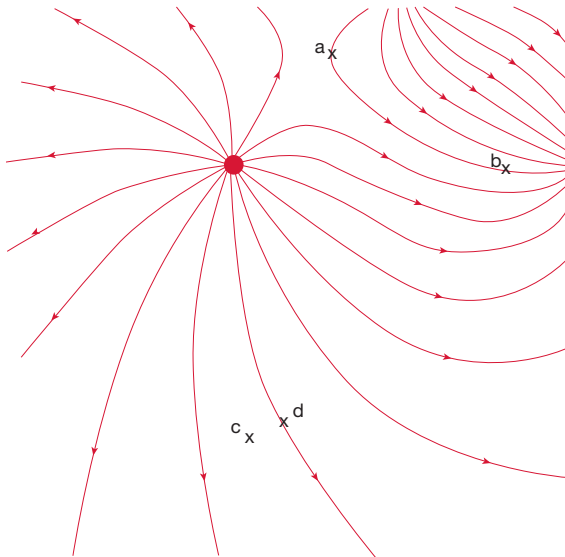
41. Aunque las fórmulas para las fuerzas eléctrica y gravitacional adoptan la misma forma, existen diferencias en las dos. ¿Cuáles son algunas de estas diferencias?
42. ¿Cuáles son las semejanzas entre las fuerzas eléctrica y gravitacional?
43. Cuando nos acercamos a otra persona, no estamos conscientes de las fuerzas gravitacional y eléctrica entre nosotros. En cada caso, ¿cuáles son las razones?
44. Aunque las fuerzas eléctricas entre los electrones y los protones son mucho más fuertes que las fuerzas gravitacionales, éstas determinan los movimientos en el Sistema Solar. ¿Por qué?
45. ¿Por qué las aceleraciones de todos los objetos cargados cerca de una esfera cargada no son iguales?
- ▲ 46. En el capítulo, comparamos las fuerzas eléctrica y gravitacional entre un electrón y un protón. ¿Por qué es válido el resultado para todas las separaciones?
47. Una esfera metálica con una carga de +3 coulombs experimenta una fuerza eléctrica de 15 newtons dirigida hacia la izquierda. Si la carga en la esfera aumenta a 6 coulombs, ¿cuál fuerza experimentará?
48. Una esfera metálica con una carga de +2 coulombs experimenta una fuerza eléctrica de 25 newtons dirigida hacia

la izquierda. Si la carga en la esfera cambia a  $-8$  coulombs, ¿cuál fuerza experimentará la esfera?

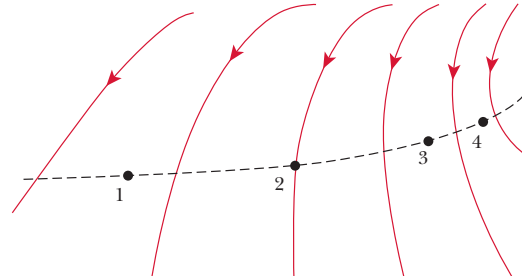
49. Las líneas del campo eléctrico entre dos placas cargadas paralelas en todas partes son perpendiculares a las placas y paralelas entre sí, como se observa en la figura. Una partícula pequeña cargada positivamente colocada a la mitad entre las placas experimenta una fuerza eléctrica de una magnitud  $F$ . Si la partícula cargada se colocara en la ubicación A, cerca de la placa positiva, ¿la fuerza en la partícula sería mayor, igual, o menor que  $F$ ? Utilice el concepto de las líneas del campo para justificar su respuesta.



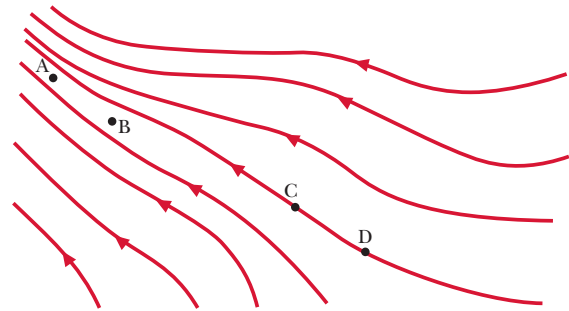
50. Para la situación descrita en la pregunta 49, la partícula cargada se suelta de las demás en el punto medio y choca contra la placa negativa a una velocidad  $v$ . Si en lugar de eso la partícula se hubiera soltado en reposo en el punto A, ¿hubiera chocado contra la placa a una velocidad mayor, igual, o menor que  $v$ ? Explique su razonamiento.
51. Un electrón y un protón se sueltan en una región del espacio en donde el campo eléctrico está verticalmente hacia arriba. ¿Cómo se comparan las fuerzas eléctricas en el electrón y el protón?
52. ¿Cómo se comparan las aceleraciones del protón y el electrón de la pregunta 51?
53. A continuación se presenta una parte de un campo eléctrico. Con una  $x$ , se marcaron dentro del campo cuatro ubicaciones denominadas a, b, c y d. Dibuje los vectores que representan la fuerza en una carga de prueba positiva cuando se coloca en cada una de estas ubicaciones. Explique su razonamiento.



54. Las líneas del campo (líneas continuas) presentadas a continuación representan el campo eléctrico en cierta región del espacio. Se suelta una partícula cargada con una velocidad inicial y sigue la trayectoria de los puntos 1 al 4 representada por la línea de guiones. Dibuje vectores para representar la fuerza sobre la partícula cargada en cada ubicación. ¿Cuál es el signo de la partícula cargada? Explique cómo puede saberlo.



55. La figura presenta las líneas del campo eléctrico en una región vacía del espacio. ¿El campo eléctrico en la región entre A y B es mayor, igual, o menor que el campo eléctrico en la región entre C y D? Explique.



56. En la figura descrita en la pregunta 55, los puntos A y B y los puntos C y D están separados por distancias iguales. ¿La diferencia de potencial entre A y B es mayor, igual, o menor que la diferencia de potencial entre C y D? Explique.
- ▲ 57. Se observa que un protón se mueve a una velocidad  $v_0$  en el punto A en el espacio donde el potencial eléctrico son 750 volts. Se mueve al punto B en donde el potencial eléctrico son 550 volts. ¿Su velocidad en el punto B es mayor, igual, o menor que  $v_0$ ? Explique.
- ▲ 58. Se observa que un electrón se mueve a una velocidad  $v_0$  en el punto A en el espacio donde el potencial eléctrico son 750 volts. Se mueve al punto B en donde el potencial eléctrico son 550 volts. ¿Su velocidad en el punto B es mayor, igual, o menor que  $v_0$ ? Explique.
59. ¿Cómo se define el valor del potencial eléctrico en cada punto en el espacio definido?
60. ¿Cuál es la definición del valor de la energía eléctrica potencial de un objeto cargado en cada punto en el espacio?
- ▲ 61. Se suelta un protón de los demás en un campo eléctrico uniforme. ¿La energía eléctrica potencial del protón aumenta o disminuye? Explique.
- ▲ 62. Se suelta un electrón de los demás en un campo eléctrico uniforme. ¿La energía eléctrica potencial del electrón aumenta o disminuye? ¿El electrón se mueve hacia una ubicación con un potencial eléctrico más alto o más bajo? Explique.

## EJERCICIOS

- Un ion de sodio contiene 11 protones, 12 neutrones y 10 electrones. ¿Cuál es la carga neta del ion?
- ¿Cuál es la carga neta de un ion de yodo que contiene 53 protones, 74 neutrones y 54 electrones?
- El núcleo de cierto tipo de átomo de plutonio contiene 94 protones y 150 electrones. ¿Cuál es la carga total del núcleo?
- ¿Cuántos electrones se requieren para tener una carga total de  $-1$  coulomb?
- ¿Cuál es la fuerza de atracción eléctrica entre cargas de  $+3$  C y  $-6$  C separadas por una distancia de  $2$  m?
- ¿Cuál distancia deben estar separadas dos cargas de  $+4$  C para que la fuerza repulsiva entre ellas sea  $3.6 \times 10^{10}$  N?
- El núcleo del litio contiene tres protones y tres neutrones. Cuando se eliminan dos electrones del átomo de litio neutro, el electrón restante tiene una distancia promedio desde el núcleo de  $0.018$  nm. ¿Cuál es la fuerza entre el electrón y el núcleo en esta separación?
- En un sólido iónico, como la sal de mesa común (NaCl), se transfiere un electrón de un átomo a otro. Si una distancia de  $0.1$  nm separa los átomos, ¿cuán intensa es la fuerza eléctrica entre ellas?
- ¿Cuánto más intensa es la fuerza eléctrica entre 2 protones que la fuerza gravitacional entre ellos?
- Calcule la razón de la fuerza eléctrica entre la fuerza gravitacional entre 2 protones.
- Una carga de  $5$  mC experimenta una fuerza de  $4$  N dirigida hacia el norte. ¿Cuál es el campo eléctrico (magnitud y dirección) en el lugar de la carga? Encuentre la fuerza sobre una carga de  $-20$  mC que reemplaza la carga de  $5$  mC.
- Una carga de  $-20$  mC experimenta una fuerza de  $25$  N dirigida hacia el oeste. ¿Cuál es el campo eléctrico (magnitud y dirección) en el lugar de la carga? Si esta carga se elimina y no se reemplaza, ¿cuál es el campo eléctrico en este lugar?
- ¿Cuál es el campo eléctrico a una distancia de  $4$  cm desde  $2$  mC de una carga negativa?
- ¿Cuál es el campo eléctrico a una distancia de  $2$  m desde  $4$  C de una carga positiva?

- ¿Cuál es el campo eléctrico a una distancia de  $0.2$  nm desde un núcleo de carbono que contiene seis protones y seis neutrones?
- ¿Cuál es el campo eléctrico a  $5.3 \times 10^{-11}$  m desde un protón?
- ¿Cuál es el campo eléctrico a la mitad entre cargas de  $2$  C y  $5$  C separadas  $2$  m?



- ¿Cuál es el campo eléctrico a la mitad entre un electrón y un protón separados  $0.2$  nm?
- ▲ ¿Cuál es la fuerza sobre un protón ubicado en un campo eléctrico de  $5000$  N/C? ¿Cuál es la aceleración del protón?
- ▲ ¿Cómo cambiarían los valores obtenidos en el ejercicio 19 si se sustituyera el protón con un electrón?
- Se sabe que la energía eléctrica potencial de un objeto en el punto A es  $40$  J. Si se suelta en reposo en A, adquiere  $50$  J de energía cinética cuando se mueve al punto B. ¿Cuál es su energía potencial en B?
- Si el objeto del ejercicio 21 tuviera una carga de  $+2$  C, ¿cuál sería la diferencia de potencial entre los puntos A y B?
- ¿Cuánto trabajo efectúa una batería de  $12$  V al impulsar  $2$  mC de carga a través de un circuito que contiene un bombillo?
- Los puntos A y B tienen un potencial eléctrico de  $+9$  V. ¿Cuánto trabajo se requiere para llevar  $3$  mC de carga de A a B?
- ¿Cuál era su potencial eléctrico respecto a un tubo metálico si una chispa saltó  $1.3$  cm ( $0.5$  pulgadas) por el aire seco desde su dedo hasta el tubo?
- ¿Qué tan lejos puede saltar una chispa en el aire seco si la diferencia del potencial eléctrico es  $6 \times 10^5$  V? (Por esta razón las fuentes de alto voltaje se rodean con un vacío o un fluido aislante.)



# 11

## Corriente eléctrica

© Jack Aiello/Shutterstock



Vivimos en un mundo eléctrico. Es difícil imaginar un mundo sin electricidad. ¿Cómo produce el movimiento de los electrones la luz que nos permite trabajar y jugar en interiores y en la noche?

---

(Consulte la respuesta a esta pregunta en la página 216.)

---

*Esta escena nocturna es un ejemplo del uso artístico de la iluminación.*

Los fenómenos nuevos a menudo entran a nuestra visión del mundo de manera accidental, como resultado de alguien con una mente abierta que hace una observación o efectúa un experimento. Al principio, estos fenómenos suelen ser sólo curiosidades, nuevos desafíos para nuestra comprensión del mundo. Muchos de ellos nos ofrecen maneras nuevas de hacer cosas y, en algún momento, hallar un uso extenso cuando los comprendemos mejor. Sin embargo, en algunos casos, nace una tecnología nueva completa. Las propiedades eléctricas que estudiamos en el capítulo 10 fueron de ese tipo de curiosidades. En los primeros días de la investigación de estos fenómenos, la electricidad se utilizaba poco, excepto para construir aparatos con los cuales sorprender a los amigos. En los 200 años anteriores, la electricidad se ha convertido en una presencia tecnológica principal en nuestra sociedad. En la actualidad, Estados Unidos, con 5% de la población mundial, emplea cerca de una cuarta parte de la electricidad generada en el mundo. Esto significa que el ciudadano estadounidense normal utiliza cinco veces la electricidad que el ciudadano del mundo promedio, incluyendo los de los países desarrollados. Cuando se compara la utilización de electricidad de los ciudadanos estadounidenses con los de los países del tercer mundo, el uso per cápita es mucho más grande.

Un avance importante en la comprensión de la electricidad llegó con el desarrollo de las baterías. Las baterías hacen que las cargas eléctricas fluyan de manera continua, como una corriente, y no como ráfagas cortas. Este descubrimiento terminó por conducir a los circuitos eléctricos modernos que han tenido un impacto obvio en nuestras vidas. Las corrientes eléctricas pueden producir calor y luz, hacer funcionar motores y radios, accionar sistemas de sonido y computadoras, y muchas otras cosas. La lista es casi interminable.

## Un descubrimiento accidental

Cerca del final del siglo XVIII, el anatomista italiano Luigi Galvani anunció que el anca amputada de una rana se contrajo cuando la tocó. Se sabía bien a partir de experiencias directas con la electricidad estática que las contracciones en las personas podrían ser el resultado de cargas eléctricas. ¡Pero esta era sólo una pierna! Galvani estaba convencido de haber descubierto la fuerza vital secreta que creía que existía dentro de todos los animales. Galvani encontró que ocurría una contracción cuando tocaba el anca de la rana con un objeto metálico, pero no cuando la tocaba con un aislante. Además, el metal tenía que ser diferente del gancho metálico que sostenía el otro extremo de la pierna. Se necesitaban dos metales diferentes para producir la contracción.

Otro científico italiano, Alessandro Volta, se enteró de estos resultados y efectuó muchos experimentos con electros copios muy sensibles, en busca de evidencia de que la carga eléctrica reside en el tejido animal. Terminó por convencerse que la electricidad no estaba en el anca de la rana, sino era el resultado de tocarla con los dos metales.

Volta probó muchos metales diferentes y descubrió que se producía una diferencia de potencial eléctrico cada que se unían dos metales distintos. Algunas combinaciones de metales producían diferencias de potencial más grandes que otras. Una de sus demostraciones fue colocar su lengua entre pedazos de plata y zinc sostenidos juntos en un extremo. El flujo de la electricidad hizo que su lengua cosquilleara. Usted puede sentir una sensación similar cuando un pedazo de metal o una hoja metálica toca una obturación metálica en sus dientes. Una explicación más detallada de este proceso nos llevaría más allá del alcance de este libro, pero basta comprender que algunos procesos químicos mueven cargas de un metal a otro, lo cual crea una diferencia de potencial.

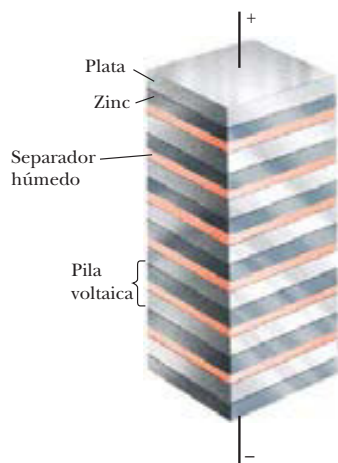


© Charles D. Winters

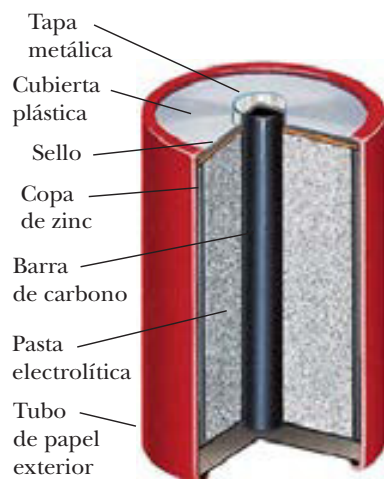
Una versión moderna de la demostración de Volta, en la que barras de zinc y cobre insertadas en una toronja producen una diferencia de potencial. (La cereza es sólo para propósitos decorativos.)

## FÍSICA | HÁGALO USTED MISMO

Prepare una batería al fijar un sujetador de papeles y un pedazo de alambre de cobre a un limón. Puede sentir el voltaje al colocar las puntas de los alambres en su lengua.



**Figura 11-1** Un esquema de la batería de Volta, formada por placas de zinc y plata con papel húmedo entre ellas.



**Figura 11-2** Esquema de una pila seca tipo linterna común.

## Baterías

Volta utilizó su descubrimiento de que dos metales distintos producen una diferencia de potencial eléctrico para hacer la primera batería. Hizo una sola pila al poner un pedazo de papel que había humedecido en una solución salina entre pedazos de plata y zinc. Después apiló estas secciones tal como se presenta en la figura 11-1. Al hacer esto, fue capaz de producir una diferencia de potencial más grande. La diferencia de potencial de todas las pilas juntas era igual a la suma de las diferencias de potencial producidas por las pilas individuales.

La diferencia de potencial de una pila depende de la elección de los metales. Los que suelen utilizarse en las baterías tienen diferencias de potencial de  $1\frac{1}{2}$  a 2 volts. La colocación de placas de plomo y óxido de plomo (conocidas como electrodos) en ácido sulfúrico diluido (el electrolito) hace una pila de 2 volts sencilla. La conexión de seis de estas pilas produce una batería de automóvil de 12 volts. El electrodo positivo de una pila se conecta al electrodo negativo de la siguiente. Los conectores que sobresalen de la primera y la última pilas (las terminales) se suelen marcar con un signo + o -, para indicar el exceso de sus cargas.

**Pregunta** ¿Cuántas pilas de  $1\frac{1}{2}$  volts se requieren para hacer una batería de 9 volts?

**Respuesta** Como se suman los voltajes de las pilas, se necesitan seis pilas.

Las baterías que se pueden recargar se llaman *baterías de almacenamiento*. Esta recarga se suele lograr con un cargador eléctrico con las terminales negativas del cargador y la batería conectadas entre sí y las terminales positivas conectadas entre sí. El cargador obliga a que la corriente retroceda hasta la batería, invirtiendo las reacciones químicas y refrescando la batería. Esta energía eléctrica se almacena como energía química en la batería para su uso posterior.

Las baterías tipo linterna no recargables (también llamadas *pilas secas*) se construyen con una barra de carbono en el centro, como en la figura 11-2. El carbono es un conductor y reemplaza uno de los metales. Una pasta húmeda que contiene el electrolito rodea la barra. El otro electrodo es la copa de zinc que rodea la pasta. Después la pila se cubre con un material aislante. Estas pilas de  $1\frac{1}{2}$  volts a menudo se emplean de punta a punta (ambas apuntando en la misma dirección) para proporcionar los 3 volts utilizados en muchas linternas.

El voltaje producido por una pila individual depende de los materiales utilizados, y no de su tamaño. El tamaño determina la cantidad total de químicos utilizados y, por lo tanto, la cantidad total de carga que se puede transferir. Hemos visto que el voltaje se incrementa al colocar las pilas de punta a punta en fila, una distribución llamada **en serie**. Las pilas (o baterías) también se colocan lado a lado, o **en paralelo**, como se presenta en la figura 11-3. Todas las pilas deben apuntar en la misma dirección. Esta distribución en paralelo no aumenta el voltaje, pero incrementa el tamaño efectivo de la batería. Una mayor cantidad de químicos significa que las baterías durarán más antes de agotarse.

**Pregunta** ¿Cuándo necesita usted conectar baterías en paralelo?

**Respuesta** Esto es muy útil cuando las baterías son difíciles de cambiar, como en los radiotransmisores remotos o en las cimas de las montañas.

La electricidad del hogar tiene varias diferencias de la electricidad producida por baterías. La electricidad en el hogar se suministra en un voltaje mucho más alto, que suele ser 110 volts. Esta electricidad es producida por enormes generadores eléctricos en presas o plantas eléctricas que consumen carbono, petróleo, gas, o combustible nuclear. (En el capítulo siguiente analizaremos los generadores.) En los circuitos de una casa, el flujo de la carga (la corriente) cambia de dirección 120 veces por segundo. Esto se denomina *corriente alterna* (ca) de 60 ciclos, y es lo

opuesto de la *corriente directa* (cd) proporcionada por las baterías que fluyen en una sola dirección.

Debido a que casi todos los usos de la electricidad que analizaremos en este capítulo sólo dependen del flujo de la carga, y no de su dirección, simplificaremos nuestros análisis al referirnos a las baterías de linterna. Otra ventaja de utilizar baterías es que tienen voltajes bajos, de modo que puede experimentar con algunas de las ideas mencionadas aquí sin temor de electrocución. Por otra parte, la **electricidad del hogar** es peligrosa y **no debe utilizarse en experimentos**.

## Rutas de conducción

La invención de las baterías dio a los experimentadores un modo de producir un flujo de carga continua: una **corriente**. Aunque las propiedades de las cargas eléctricas que interactúan no cambian desde el capítulo anterior, se observan efectos nuevos cuando las cargas se mueven por rutas de conducción de manera continua. El modo más sencillo de conocerlas es experimentar con una simple batería de linterna, un poco de cable, y algunos bombillos de linterna. Las propiedades básicas de la electricidad del hogar son simples extensiones de estas ideas.

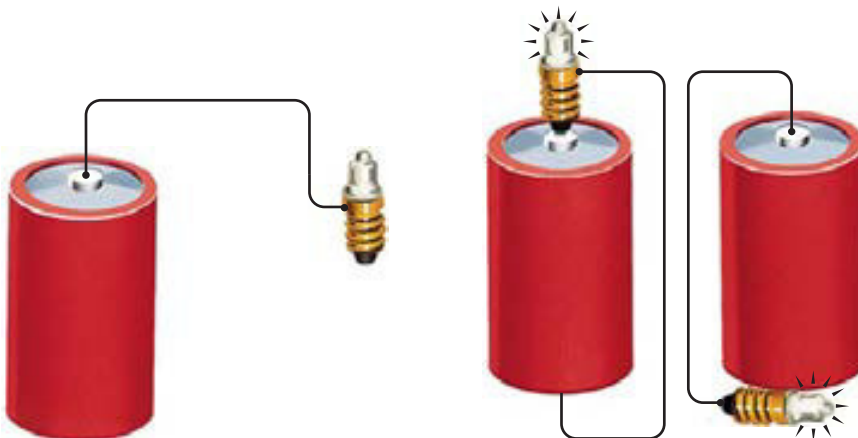
Imagine que tiene una batería, un cable y un bombillo. A partir de sus experiencias anteriores, ¿puede predecir una distribución que encienda el bombillo? Una respuesta común es conectar el bombillo a la batería, igual que en la figura 11-4. El bombillo no enciende. No importa cuál extremo de la batería utilice o cuál parte del bombillo toque. Las cargas no fluyen de un extremo de la batería al bombillo y lo encienden. Suponga que sostiene el alambre en un extremo de la batería y la punta metálica del bombillo en el otro extremo. En algún momento tendrá éxito poner en contacto el extremo libre del cable con diferentes partes del bombillo. La figura 11-5 presenta dos de las cuatro distribuciones posibles para encender el bombillo.

La comparación de los métodos con los que enciende el bombillo con los modos que no enciende, indica que debemos utilizar dos partes de cada objeto: los dos extremos del cable, los dos extremos de la batería y las dos partes metálicas del bombillo. Las dos partes del bombillo son la punta metálica y el metal que rodea la base (en muchos bombillos, éste está roscado). Cada que los seis extremos se conectan en pares, y forman un circuito continuo (sin importar cómo lo hagan), el bombillo se enciende.

La trayectoria de conducción continua (conocida como **circuito completo**) permite que fluyan las cargas eléctricas de una punta de la batería a la otra. Si se va encender el bombillo, la trayectoria de conducción debe atravesarlo. Puede verificar esto al examinar un bombillo sin vidrio esmerilado, como en la figura 11-6. La parte del bombillo que destella es un cable delgado (llamado *filamento*) que está apoyado por dos cables más gruesos que salen de la base. El bombillo tendría que



**Figura 11-3** Dos pilas en paralelo tienen el mismo voltaje que una pila única, pero duran el doble.



**Figura 11-4** Un intento fallido para encender un bombillo.

**Figura 11-5** Modos exitosos de encender un bombillo.



**Figura 11-6** Dibujo esquemático que muestra la trayectoria de conducción continua a través de un bombillo.



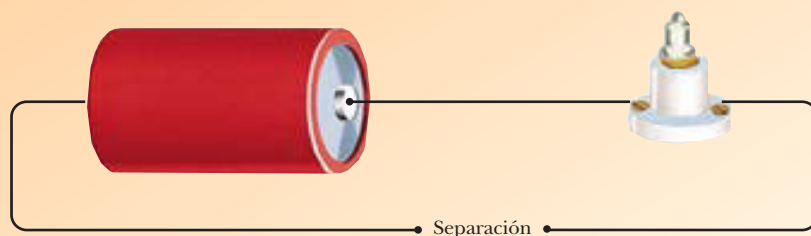
seccionarse para ver que uno de estos cables de apoyo está conectado a la punta metálica y el otro al lado metálico del bombillo. El resto del bombillo está hecho de materiales aislantes, de modo que haya una sola trayectoria de conducción a través del filamento dentro del bombillo.

**Pregunta** ¿El bombillo todavía encendería si colocara la batería en la dirección opuesta, en las distribuciones presentadas en la figura 11-5?

**Respuesta** Cualquier extremo de la batería funciona, porque invertir la batería no cambia la trayectoria de conducción.

### FÍSICA | HÁGALO USTED MISMO

Conecte un bombillo de linterna a una batería de linterna, y deje una separación en el circuito. Pruebe diversos materiales para ver si son conductores al insertarlos en la separación, igual que en la figura 11-7.



**Figura 11-7** Cuando se pone un material conductor entre los cables en la separación, el bombillo se enciende.

La combinación del concepto de un circuito completo con la idea de la conservación de una carga lleva a la conclusión de que la electricidad sale por una punta de la batería y regresa por la otra. La carga que sale por un extremo de la batería regresa al otro extremo. La carga no se pierde ni se agota en el trayecto.

**Pregunta** ¿De qué modo la información sobre las trayectorias de conducción explica por qué no se enciende el bombillo de la figura 11-4?

**Respuesta** Debido a que no hay una trayectoria de conducción para que las cargas regresen al otro extremo de la batería, no existe un circuito completo.

## Un modelo con agua

El flujo de una carga en un circuito completo es similar al flujo del agua en un sistema de tubos cerrados. La batería es similar a una bomba, los cables a los tubos, y el bombillo (algo que transforma la energía del flujo a otra forma) a un rueda con remos que gira cuando fluye el agua (figura 11-8). En un sistema de tubos cerrados, el agua que sale de la bomba regresa al lado del tubo de admisión de la bomba.

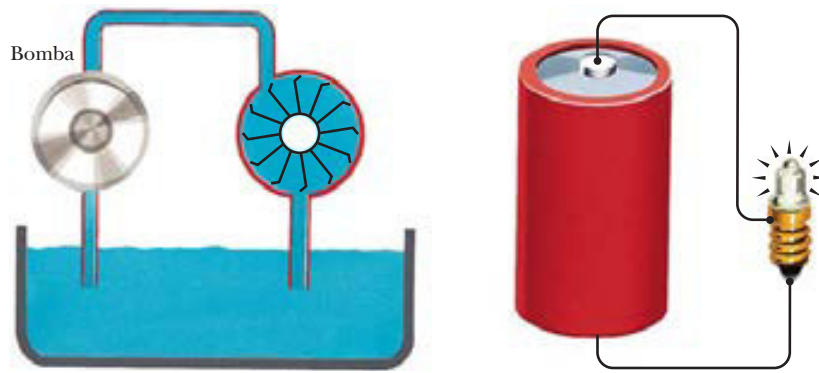
El modelo con agua es útil para aclarar la diferencia entre corriente, carga y voltaje. La corriente es una medida de la cantidad de carga que fluye por una sección determinada del circuito en un tiempo unitario. Si medimos una carga  $\Delta Q$  que pasa el punto en un intervalo de tiempo  $\Delta t$ , la corriente  $I$  en el circuito es

$$\text{corriente} = \frac{\text{carga}}{\text{tiempo}} \rightarrow$$

$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t}$$

Esta expresión es similar a la velocidad con la que el agua fluye por un tubo. El flujo del agua se mide en unidades como litros por segundo. La corriente eléctrica se mide en **coulombs** por segundo, una unidad conocida como ampere (A). Las





**Figura 11-8** El flujo de una carga es similar al flujo del agua por un sistema cerrado.

baterías de linterna suelen proporcionar menos de 1 ampere de corriente, los circuitos caseros normales suelen limitarse a un máximo de 20 amperes, y una batería de automóvil proporciona más de 100 amperes cuando enciende el automóvil. (La definición precisa del ampere se dará en el capítulo siguiente.)

El voltaje entre dos puntos en un circuito es una medida del cambio en el potencial eléctrico entre estos dos puntos. Es decir, el voltaje es una medida del trabajo efectuado al mover una carga eléctrica unitaria entre los dos puntos. El trabajo es igual a la distancia que mueve la carga sobre el circuito, multiplicada por la fuerza sobre la carga eléctrica unitaria producida por el campo eléctrico que existe en el circuito. También puede considerar el voltaje como similar a la presión en nuestro modelo con agua.

Aunque el modelo con agua es útil, es importante comprender sus limitaciones. El circuito eléctrico siempre está “lleno” con cargas; no necesita llenarse como una manguera de jardín. Una interrupción en un circuito eléctrico hace que la electricidad deje de fluir; no se derrama en el extremo del cable como sucedería con el agua en un conducto roto. Un circuito eléctrico no es similar a un sistema de riego utilizado en un prado. Una válvula bloquea el flujo del agua, mientras que un interruptor pone una separación en la trayectoria de conducción para detener el flujo de la electricidad.

Otra diferencia es que, en un conductor, uno o ambos tipos de carga están en libertad de moverse. En los plasmas y en los líquidos y gases ionizados, ambas cargas se pueden mover. No fue hasta 1879 que los experimentos determinaron que sólo algunos electrones cargados negativamente se pueden mover en los metales. Para casi todos los efectos macroscópicos, las cargas positivas que se mueven en una dirección equivalen a las cargas negativas que se mueven en la dirección opuesta. Por ejemplo, considere dos esferas metálicas neutras. Si usted mueve 1 coulomb de una carga positiva de la esfera A a la esfera B, B tiene un exceso de 1 coulomb de carga positiva. La esfera A tiene una deficiencia de 1 coulomb de carga positiva o, lo que es lo mismo, un exceso de 1 coulomb de carga negativa. Las cargas netas en las dos esferas son idénticas para mover 1 coulomb de carga negativa de B a A. Debido a esta equivalencia, al igual que a los orígenes históricos del tema, al analizar el efecto macroscópico de una corriente, adoptamos la convención de suponer que la dirección de la corriente eléctrica es igual que el flujo de las cargas positivas.

## Resistencia

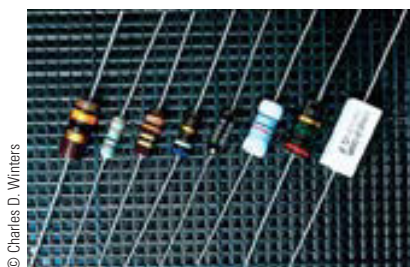
### ✓ MATEMÁTICAS

Si se deja un bombillo conectado a una batería, la batería se agota en menos de un día. (El tiempo real depende del bombillo y la batería específicos utilizados.) El bombillo tiene el mismo resplandor casi todo este tiempo, pero cerca del final se atenúa y se apaga. Sin embargo, si conecta sólo un cable por los extremos de la batería, ésta se agota en menos de 1 hora, y el cable se calienta tanto que no es posible tocarlo. Debido a que la batería se agota mucho más rápido y es obvio que algo ocurre en el cable, deducimos que la corriente es más grande por el cable que por la trayectoria de conducción con el bombillo. El bombillo ofrece más **resistencia** al flujo de la electricidad. Es importante observar que la cantidad de corriente que

✓ El suplemento *Problem Solving* (Solución de problemas) ofrece una presentación extendida.

**Tabla 11-1** | La resistencia de diferentes cables de 100 metros de longitud con un diámetro de 1 milímetro

Metal	Resistencia ( $\Omega$ )
Plata	2.02
Cobre	2.16
Oro	3.11
Aluminio	3.59
Tungsteno	7.13
Hierro	12.7
Cromoníquel	191



© Charles D. Winters

En los circuitos eléctricos se emplean resistores.

proporciona una batería depende de lo que está conectado a ella. Un aumento en la resistencia en el circuito disminuye la corriente que pasa por la batería, y una disminución de la resistencia en el circuito aumenta la corriente que pasa por la batería.

Esta noción de una resistencia también tiene sentido de acuerdo con el modelo con agua. Cada minuto, fluye más agua por los tubos amplios que por los angostos. El filamento del bombillo es una sección muy delgada de cable y debe ofrecer más resistencia. Nuestra analogía también nos dice que los tubos extensos ofrecen más resistencia que los tubos cortos. Por lo tanto, esperaríamos que la resistencia de los cables aumentara con la longitud y disminuyera con el diámetro. El otro factor —que no es tan obvio desde nuestro modelo con agua— es que la resistencia depende del tipo de material utilizado para los cables. Estas ideas se verifican mediante experimentos con cables de diferentes tamaños y materiales. La tabla 11-1 compara las resistencias de cables con la misma longitud y diámetro, pero hechos de metales distintos.

La resistencia es el resultado de la interacción de la ruta de conducción con el flujo de la carga. Los electrones en un cable sienten una fuerza neta producida por la repulsión de la terminal negativa y la atracción de la terminal positiva y se aceleran; los electrones experimentan fuerzas producidas por el campo eléctrico que existe en el cable. Sin embargo, los electrones no van muy lejos antes de chocar con los átomos, lo cual provoca que pierdan velocidad y se desvíen en direcciones aleatorias. Aunque es bastante alta la velocidad promedio de los electrones debido a su movimiento interno, todos estos choques evitan que se muevan muy rápido sobre el cable; una velocidad promedio común sobre el cable está en el orden de milímetros por segundo. Esta impedancia al flujo de la carga determina la resistencia del cable.

Cuando los electrones se desplazan por un cable, experimentan choques que transfieren energía cinética a los átomos y que hacen que aumente la temperatura del cable. Si se transfiere energía suficiente, el cable se calienta lo suficiente para resplandecer. Las bobinas y los elementos calefactores en las estufas, hornos, tostadoras, calefactores de piso, y luces hacen esto. Se emplean resistores para controlar los voltajes y las corrientes en los circuitos utilizados en aparatos tales como radios y rizadores.

Una resistencia  $R$  se define como el voltaje  $V$  que atraviesa un objeto dividido entre la corriente  $I$  de un lado a otro del objeto:

$$\text{resistencia} = \frac{\text{voltaje}}{\text{corriente}} \rightarrow$$

$$R = \frac{V}{I}$$

La resistencia es el número de volts que atraviesan un objeto requerido para impulsar 1 ampere de corriente de un lado a otro del objeto, y por lo tanto se mide en volts por ampere, una unidad conocida como **ohm** ( $\Omega$ , la omega griega en mayúscula). Esta definición siempre es válida, pero es más útil cuando la resistencia es constante o relativamente constante. En este caso, esta relación se conoce como la **ley de Ohm**. Las resistencias de pedazos de metales, carbono, y otras sustancias son aproximadamente constantes si se mantienen a una temperatura constante. La resistencia del filamento en un bombillo aumenta cuando el filamento se calienta.

### ✓ MATEMÁTICAS

## SOLUCIÓN | Ley de Ohm

La ley de Ohm nos proporciona una relación entre la resistencia de, la diferencia de potencial (voltaje) a través de, y la corriente de un lado a otro de un elemento de un circuito. Por ejemplo, suponga que tenemos una batería de 12 V y queremos producir una corriente de 1 A en un circuito específico. ¿Qué resistencia debe tener el circuito?

$$R = \frac{V}{I} = \frac{12 \text{ V}}{1 \text{ A}} = 12 \Omega$$

continúa en la página siguiente

**Pregunta** Si un bombillo atrae una corriente de 0.5 A cuando se conecta a un circuito de 110 V, ¿cuál es la resistencia de su filamento?

**Respuesta**  $R = V/I = (110 \text{ V})/(0.5 \text{ A}) = 220 \Omega$ .

La ley de Ohm se puede reorganizar para encontrar cualquiera de las tres cantidades cuando se conocen las otras dos. Suponga que un elemento calefactor tiene una resistencia de  $8 \Omega$  cuando está caliente. ¿Qué corriente atraerá cuando se conecte a 110 V?

$$I = \frac{V}{R} = \frac{110 \text{ V}}{8 \Omega} = 13.8 \text{ A}$$

**Pregunta** Si el bombillo de una linterna de 3 V tiene una resistencia de  $9 \Omega$ , ¿cuánta corriente atraerá el bombillo?

**Respuesta**  $I = V/R = (3 \text{ V})/(9 \Omega) = \frac{1}{3} \text{ A}$ .

## El peligro de la electricidad

La electricidad es peligrosa porque nuestros cuerpos son máquinas eléctricas. Nuestros músculos se tensan cuando “se encienden” las neuronas. Normalmente una cadena compleja de reacciones químicas activa esta reacción, pero también puede ocurrir cuando fluyen cargas eléctricas por el músculo. ¡Este proceso es el origen de las contracciones! Esta situación se puede volver peligrosa cuando el músculo es parte del sistema cardíaco o respiratorio. En estos casos, la corriente también puede afectar las señales del ritmo, e interrumpir los procesos naturales. En algunas personas, corrientes tan reducidas como 50 miliamperes pueden interrumpir la respiración.

Con frecuencia, las personas sienten que el peligro con la electricidad es el voltaje. Aunque los voltajes altos son peligrosos, lo que es letal es la corriente de un lado a otro de un cuerpo. La ley de Ohm nos dice que la corriente es igual al voltaje dividido entre la resistencia de la trayectoria. En este caso, el cuerpo es parte de la trayectoria. Si las condiciones son tales que la resistencia total es baja, incluso un voltaje bajo puede provocar una corriente peligrosamente alta. La resistencia de la piel seca es lo bastante alta para que usted ponga un dedo sobre las terminales de una batería de 9 volts sin sentir nada. Sin embargo, si toca las terminales de la batería de 9 volts con su lengua, usted siente una corriente. La humedad de la lengua reduce la resistencia.

Una manera de evitar que las corrientes altas atraviesen su cuerpo, en especial su corazón, es conservar una mano en su bolsillo. También es bueno utilizar calzado con suelas de hule.

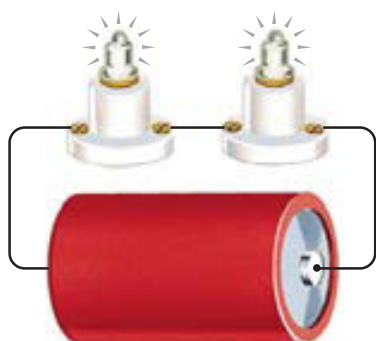
## Un modelo para la corriente eléctrica



Podemos utilizar bombillos de linterna para crear un modelo simple de circuitos eléctricos más complicados. Cada bombillo funciona como un indicador visual de la corriente que lo atraviesa. Los bombillos no resplandecen en absoluto hasta que la corriente supera cierto valor; después de eso, el resplandor aumenta con la corriente. Aunque la relación entre la corriente y el resplandor del bombillo es complicada, es razonable suponer que si un bombillo resplandece más que un bombillo idéntico, debe tener más corriente. Se dice que “más flujo significa más resplandor”.

Primero creamos una norma a la cual podemos hacer referencia; el resplandor de un bombillo único conectado a una batería única representará una corriente normal. Supondremos que todas las baterías y bombillos son idénticos.

Se conectan dos bombillos a una batería de modo que haya una sola trayectoria de la batería a través de un bombillo, a través del segundo bombillo, y de



**Figura 11-9** Los bombillos conectados en serie resplandecen iguales, pero más atenuados que en un circuito normal.

regreso al otro extremo de la batería. En esta disposición (figura 11-9), se dice que los dos bombillos están en serie entre sí. Observamos que los dos bombillos tienen el mismo resplandor y que están más atenuados que el bombillo único del circuito normal. Esta disminución en el resplandor indica que existe menos corriente en el circuito en serie que en nuestro circuito normal. La observación de que la duración de la batería en este circuito en serie es más prolongada que la duración de la batería en el circuito normal, apoya esta conclusión. Además, la resistencia de los dos bombillos en serie es mayor que la de un bombillo único. (Es tentador afirmar que el circuito en serie tiene el doble de resistencia, porque hay dos bombillos. Sin embargo, la resistencia de los bombillos cambia con el resplandor, por lo que la resistencia no se duplica.)

De especial interés es la observación de que los dos bombillos tienen el mismo resplandor. Esto nos indica que la corriente que atraviesa cada bombillo es igual; cualquier carga que fluye por el primer bombillo, fluye por el segundo. La carga eléctrica no se ha agotado ni perdido sobre la trayectoria, de acuerdo con la conservación de la carga. Regresa a la batería la misma cantidad de carga que salió de ella. Lo que provoca que el filamento se caliente y resplandezca es el flujo de la carga por un bombillo. Si fluye la misma cantidad de carga por cada bombillo cada segundo, los dos filamentos idénticos alcanzarán la misma temperatura y resplandor con la misma intensidad.

### Razonamiento defectuoso



Alan conecta un solo bombillo a una batería y observa que resplandece bastante. Después incorpora un segundo bombillo en serie con el primero y encuentra que ambos bombillos ahora están más atenuados y tienen la misma intensidad. Llega a la conclusión siguiente: “El bombillo único recibe toda la corriente de la batería. Los dos bombillos deben *compartir* la corriente, cada uno obtiene la mitad. Es natural que estén más atenuados.”

Alan cree que comprende lo que sucede, pero en su razonamiento ha incorporado un error serio. **¿Puede usted encontrarlo?**

**Respuesta** La palabra *compartir* tiene dos significados. Podemos compartir un libro o compartir una pizza. Si compartimos un libro, usted lo lee primero, y después yo. Si compartimos una pizza, primero la dividimos en dos pedazos y luego cada uno toma un pedazo. Alan cree que la corriente que atraviesa la batería siempre tiene la misma magnitud y que los dos bombillos “comparten” esta corriente como lo haríamos con una pizza. De hecho, los bombillos *comparten* la corriente como lo haríamos con un libro; primero la corriente atraviesa un bombillo (y calienta su filamento) y luego atraviesa el otro (y calienta su filamento). Los dos bombillos están más atenuados que un bombillo único porque la mayor resistencia en el circuito reduce la corriente que atraviesa la batería.



**Figura 11-10** Los bombillos conectados en paralelo resplandecen al mismo nivel y tienen el mismo resplandor que en un circuito normal.

Otra consecuencia del resplandor igual es que los bombillos no pueden usarse para determinar una dirección para el flujo de la electricidad. Todo se explica igual de bien si se supone un flujo de cargas negativas en una dirección (la situación real en los cables), un flujo de cargas positivas en la otra dirección, o que ambas cargas fluyen al mismo tiempo en direcciones opuestas (como ocurre con los fluidos). De hecho, debido a que lo único que importa es el movimiento de las cargas, también funcionaría una carga que avanza y retrocede. En la electricidad del hogar, las cargas negativas avanzan y retroceden con una frecuencia de 60 hertz.

Es posible conectar dos bombillos de modo que cada uno tenga su propia trayectoria desde una punta de la batería a la otra, como se presenta en la figura 11-10. En esta distribución, se dice que los dos bombillos están conectados en paralelo. En contraste con los bombillos en serie, la corriente en un bombillo no pasa por el otro, lo que comprobamos al desconectar cualquier bombillo y observar que el otro no resulta afectado. Los dos bombillos en paralelo resplandecen con la misma intensi-

dad, y cada uno resplandece como en un circuito normal. Debido a que cada bombillo tiene su propia trayectoria, la batería en este circuito suministra el doble de corriente que la batería en el circuito normal. Esto se puede comprobar en un experimento; en esta distribución, la batería se agota en la mitad de su duración normal.

La incorporación del bombillo adicional en paralelo ha aumentado la corriente que atraviesa la batería, lo que indica que la resistencia del circuito debe haber disminuido. Aunque se puede considerar correctamente que un bombillo es una resistencia para el flujo de la carga, la inclusión de un bombillo adicional en un circuito puede aumentar o disminuir la resistencia total del circuito, dependiendo de cómo se incorpora el bombillo. Cuando el bombillo nuevo se incluye en serie (y agrega una resistencia nueva en una línea existente) aumenta la resistencia del circuito y disminuye la corriente que atraviesa la batería. Cuando el bombillo nuevo se incorpora en paralelo (en una trayectoria nueva que no existía antes) la resistencia del circuito se reduce y aumenta la corriente que atraviesa la batería. Aun cuando la trayectoria nueva contiene una resistencia (el bombillo nuevo), representa una oportunidad nueva para un flujo que no existía antes.

Considere la analogía siguiente. Cuando termina una película con gran audiencia, las personas se dan empujones para salir del cine por la puerta principal. La anchura finita de la puerta representa la resistencia al flujo de personas. Si también se abre la puerta trasera, aumenta el flujo de personas que salen del edificio, aunque la puerta trasera sea muy estrecha. Es una nueva oportunidad para un flujo. Cualquier trayectoria que se agrega en paralelo reducirá la resistencia total de un circuito, sin tomar en cuenta cuánta resistencia contenga la trayectoria nueva.

Tres o más bombillos se pueden conectar en serie o en paralelo, o en una combinación de ambos esquemas. El resplandor relativo de estos bombillos se predice con las ideas que hemos analizado. Por ejemplo, considere la combinación de bombillos de la figura 11-11. El bombillo A resplandecerá más porque toda la corriente debe atravesarlo, pero no resplandecerá tanto como uno normal. Los bombillos B y C estarán atenuados, porque la corriente se divide: una parte atraviesa el bombillo B y la otra el bombillo C. La corriente que fluye hacia el nodo J debe ser igual a la corriente que sale del nodo. Esto es justo una consecuencia de la conservación de la carga. Debido a que los bombillos son idénticos, las resistencias de las dos trayectorias son iguales, y la corriente se dividirá en forma equitativa; los bombillos B y C tendrán el mismo nivel de resplandor.

En general, cuando la carga llega al nodo entre dos bifurcaciones paralelas de resistencia desigual, fluirá más carga a través de la bifurcación más fácil. Decimos que “la corriente prefiere la trayectoria de menor resistencia”. Esto no significa que toda la corriente siga la trayectoria más fácil; una parte de la corriente toma la trayectoria más difícil. Si la trayectoria en paralelo 1 tiene el doble de la resistencia que la trayectoria 2, la trayectoria 1 tendrá la mitad de la corriente de la trayectoria 2.

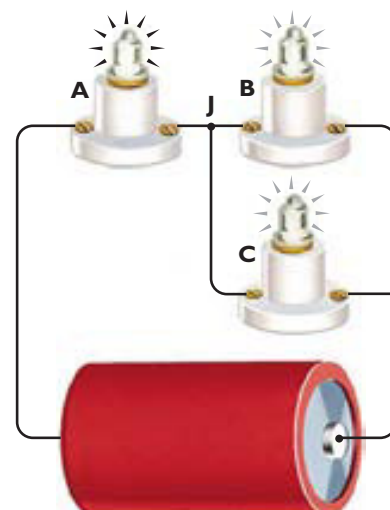
El físico alemán Gustav Kirchhoff formalizó dos reglas para analizar las corrientes en los circuitos. La **regla de los nodos de Kirchhoff** afirma que

La suma de las corrientes que entran a un nodo en un circuito es igual a la suma de las que salen de ese nodo.

Como hemos visto, ésta es una consecuencia de la conservación de la carga. En la sección siguiente analizaremos otra regla de Kirchhoff.

Si una de las trayectorias en un circuito es un cable conductor sin un bombillo, como se observa en la figura 11-12, la trayectoria tiene muy poca resistencia y prácticamente toda la corriente sigue esta trayectoria. Esto se conoce como un **cortocircuito**. Cuando hay un cortocircuito, fluye tan poca corriente por cualquier bombillo en paralelo hasta el corto, que los bombillos se apagan.

En general, las trayectorias en paralelo no son independientes entre sí. La realización de un cambio en una trayectoria en paralelo suele afectar la corriente en la otra trayectoria. La única excepción a esta regla es el caso con el que comenzamos en la figura 11-10, en donde cada trayectoria tenía conexiones directas a ambos



**Figura 11-11** Los bombillos B y C están en paralelo y el par está en serie con el bombillo A.



**Figura 11-12** Cuando el cable de la izquierda se conecta de un extremo de la batería al otro, se produce un cortocircuito y la luz se apaga.

◀ regla de los nodos de Kirchhoff



lados de una batería ideal. Se dice que estas trayectorias están “paralelas a través de la batería” y cada trayectoria actúa como si tuviera su propia batería (por razones que analizaremos más adelante).

### Razonamiento defectuoso



Tres estudiantes analizan lo que ocurrirá al resplandor del bombillo B en la figura 11-11 cuando el bombillo C se quite de su portalámparas:

**Terry:** “La corriente se divide después de pasar por A. Cuando se quita C, toda la corriente debe pasar por B, de modo que B resplandecerá más.”

**Judy:** “La eliminación del bombillo C quita una trayectoria de conducción del circuito, lo cual aumenta la resistencia del circuito. La corriente que atraviesa la batería disminuirá y B se atenuará.”

**Kay:** “Ambas tienen algo de razón. La corriente que atraviesa A disminuirá, pero B ahora obtendrá toda la corriente, en lugar de compartirla con C. Es como elegir entre una parte de una pizza grande o todo de una pequeña. Necesitamos más información para tomar una decisión.”

**¿Con cuál estudiante (de ser el caso) coincide usted?**

**Respuesta** Kay reconoce correctamente el acertijo. Sabemos que la corriente que atraviesa la batería (y, por lo tanto, el bombillo A) debe disminuir cuando se quite el bombillo C, pero no sabemos cuánto disminuirá. El modelo que hemos desarrollado hasta este momento no nos permite hacer una predicción; necesitamos agregar algo a nuestro modelo.

### Un modelo para el voltaje

Si sale de su casa y escala una montaña cercana, adquiere cierta cantidad de energía gravitacional potencial. Cuando regresa a su casa, pierde esta misma cantidad de energía gravitacional potencial, sin tomar en cuenta cuál ruta haya elegido para descender de la montaña. Ocurre lo mismo con los circuitos eléctricos. Una batería de 12 volts produce 12 joules de energía eléctrica potencial por cada coulomb de carga que la atraviesa. Cuando ese coulomb de carga viaja por el circuito y regresa a la batería, debe perder 12 joules de energía eléctrica potencial, sin tomar en cuenta cuál trayectoria siga. Esta energía eléctrica potencial se proporciona a los elementos resistivos en el circuito (como bombillos) y se convierte en calor y luz. Esta aplicación básica de la conservación de la energía se llama la **regla del bucle de Kirchhoff**:

regla del bucle de Kirchhoff ►

Sobre cualquier trayectoria de la terminal positiva a la terminal negativa de una batería, la caída del voltaje a través de los elementos resistivos encontrados, debe ser la suma del voltaje de la batería.

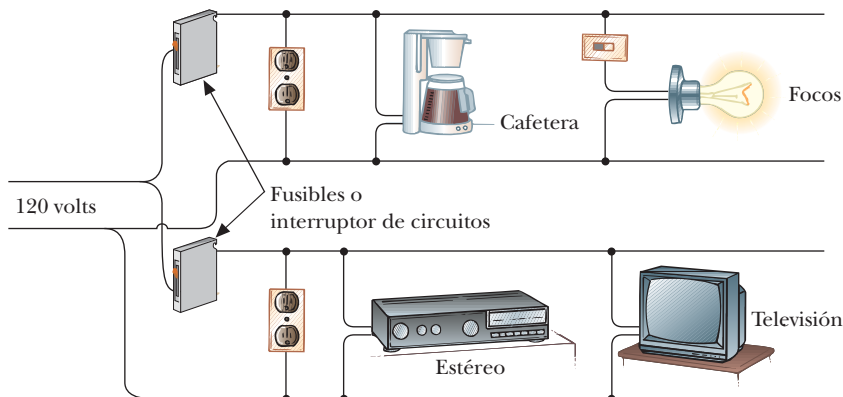
Esto significa que un bombillo único conectado a una batería tendrá una caída de voltaje igual al voltaje de la batería. A partir de la experiencia, también sabemos que un bombillo resplandecerá más cuando se conecta a una batería de 12 volts que cuando se conecta a una batería de 6 volts. Esto sugiere que el resplandor del bombillo sirve como un indicador de la caída del voltaje a través del bombillo. Si un bombillo resplandece más que otro, una caída de voltaje debe atravesarlo (suponiendo de nuevo que ambos bombillos son idénticos). Esta idea importante, acoplada con el teorema del bucle de Kirchhoff, nos permite responder muchas preguntas relacionadas con nuestro actual modelo para la corriente eléctrica.

Regresemos al acertijo presentado en el Razonamiento defectuoso más reciente. Nuestro modelo para la corriente eléctrica nos permite predecir que el bombillo A de la figura 11-11 se atenuará cuando el bombillo C se quite de su portalámparas.

Como explica Judy, el retiro del bombillo C elimina una trayectoria de conducción del circuito, lo cual aumenta la resistencia del circuito. La corriente que atraviesa la batería debe disminuir, y debido a que toda la corriente pasa por el bombillo A, este debe atenuarse. Sin embargo, el modelo actual no es capaz de predecir lo que ocurre al bombillo B. La corriente total en el circuito ha disminuido, pero la parte de esa corriente para el bombillo B ha aumentado (de 50 a 100%). ¿Cuál efecto tiene éxito? Nuestro modelo para el voltaje eléctrico responde la pregunta sin ambigüedad. La suma de los voltajes que pasan por el bombillo A y el voltaje que pasa por el bombillo B debe ser igual al voltaje de la batería, según la regla del bucle de Kirchhoff. Si el bombillo A se atenúa cuando se retira el bombillo C, el voltaje a través del bombillo A debe disminuir. Debido a que la caída del voltaje a través de los bombillos A y B debe ser igual al voltaje de la batería, el voltaje que pasa por el bombillo B debe aumentar la misma cantidad y, por lo tanto, el bombillo B resplandece más.

Ahora estamos en posición de comprender la independencia de las bifurcaciones que están en paralelo a través de una batería ideal; por qué cada bifurcación en paralelo actúa como si tuviera su propia batería. Las caídas de voltaje a través de cada bifurcación deben ser iguales al voltaje de la batería, según la regla del bucle de Kirchhoff, sin tomar en cuenta cuáles cambios se hacen en las otras bifurcaciones. Una batería de 6 volts ideal es aquella que es capaz de mantener una diferencia de potencial de 6 volts a través de sus terminales, sin tomar en cuenta cuánta corriente atrae el circuito. En la práctica, las baterías reales tienen problemas para repartir corrientes grandes, debido a las limitaciones de los procesos químicos dentro de la batería. Esta limitación se manifiesta en forma de una caída en el voltaje de la batería cuando aumenta la corriente. La adición de un segundo bombillo en paralelo a nuestro bombillo normal en realidad atenuará ligeramente el primer bombillo, si usted emplea una batería alcalina. El efecto no será perceptible con una batería recargable de níquel-cadmio. Se dice que esta batería es más ideal, y se pueden conectar muchas bifurcaciones a través de una batería de níquel-cadmio antes que aparezca el efecto. Esto supone que cada una de esas bifurcaciones contiene una resistencia y atrae una pequeña cantidad de corriente. Si una bifurcación en paralelo sólo contiene un cable conductor, exigirá más corriente de la que puede proporcionar la batería, y el voltaje de la batería cae dramáticamente, lo cual hace que se apaguen los bombillos de las otras bifurcaciones. Esto se llama “poner en corto la batería”, y es similar a lo que ocurre en un cálido día de verano cuando Los Ángeles padece un “apagón” provocado por la enorme demanda de corriente para hacer funcionar los acondicionadores de aire.

Los circuitos en las casas se conectan en paralelo para que los aparatos eléctricos se puedan encender y apagar sin afectar a los demás. Cuando se enciende un nuevo aparato, la compañía de electricidad suministra más corriente. Sin embargo, cada circuito en paralelo se conecta en serie con un interruptor de circuitos, como se presenta en la figura 11-13, para deliberadamente incorporar una “conexión débil” en el circuito. Si se conectan demasiados aparatos en un circuito, atraerán más corriente de la que los cables pueden transportar de manera segura. Por ejemplo, los cables pueden calentarse en un punto débil y comenzar un incendio. El interruptor de circuitos detiene la corriente y apaga todo.



© George Sample

Un interruptor de circuitos evita que los circuitos de una casa atraigan demasiada corriente y provoquen un incendio.

**Figura 11-13** Los aparatos se conectan en paralelo a los circuitos de una casa. Se evita que un circuito atraiga demasiada corriente mediante un interruptor de circuitos conectado en serie.

## El costo real de la electricidad

El costo real de la electricidad varía mucho, dependiendo de la fuente. Estamos muy familiarizados con la compra de energía eléctrica a una compañía local para usarla en nuestros hogares. Pero, ¿cuál es el costo de esta energía eléctrica? Si examina su factura por electricidad se entera que le cobran entre 8 y 25¢ de dólar por kilowatt-hora. Utilicemos un valor representativo de 10¢ por kilowatt-hora. Como sabemos que 1 kilowatt-hora es igual a 3.6 millones de joules, podemos dividir estas cifras para saber que podemos utilizar unos 36 millones de joules por cada dólar gastado.

También adquirimos electricidad empacada en diversas baterías. De esta manera, pagamos por las propiedades de las baterías que atraen al fabricante de los aparatos eléctricos. Esto puede incluir el tamaño, el voltaje, la duración o la capacidad de las baterías para mantener la corriente mientras se agotan. Para descubrir cuánto pagamos por la energía eléctrica, necesitamos conocer los precios y la energía eléctrica total que proporcionan las baterías durante sus vidas. Como se indica en el texto, la energía se obtiene al multiplicar la carga total entre la clasificación del voltaje de la batería. La carga total se obtiene al multiplicar la clasificación de la corriente por la duración de la batería.

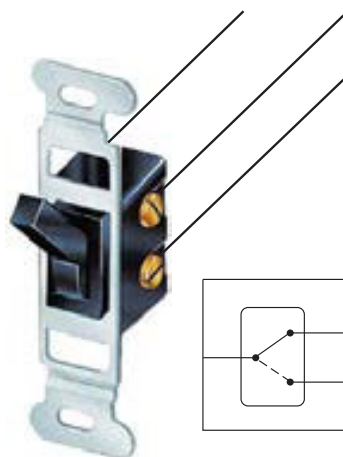
Una batería de linterna común —por lo general, una pila tipo D de carbono-zinc— cuesta alrededor de 75¢ de dólar y tiene una clasificación de 1.5 volts. Su duración depende del modo en que se utiliza. Las pilas tipo D para linternas normalmente se utilizan durante intervalos breves durante un tiempo prolongado. Bajo estas condiciones, la batería puede proporcionar 375 miliamperes durante cerca de 400 minutos, lo cual genera una carga total de 9000 coulombs y una energía total de 13 500 joules. Por lo tanto, obtiene 18 000 joules por dólar, 2000 veces el costo de la electricidad en el hogar. Las baterías alcalinas fueron un importante mejoramiento en el desempeño sobre sus compañeras de carbono-zinc, principalmente en aplicaciones que requieren corrientes continuas bastante grandes, como los radioestéreos portátiles. En las baterías alcalinas suelen durar cerca de 50-75% más que una

batería común, pero bajo ciertas condiciones pueden durar mucho más. Sin embargo, sus costos también son más altos. ¿Las baterías alcalinas son una buena compra? Sólo si el incremento en su costo es menor que el incremento correspondiente en su duración.

El descubrimiento de baterías de mercurio, plata, y litio, permitió a los fabricantes incorporar más energía en volúmenes más pequeños. Estos dispositivos tienen una corriente mucho más estable durante su duración, de modo que son especialmente útiles para aparatos como relojes de pulsera y las fotoceldas de las cámaras, las cuales requieren un valor específico para la corriente. Una batería de reloj produce 1.3 volts y 10 millonésimas de ampere durante un año, y genera una energía total de 410 joules. Si estas baterías se venden en alrededor de 2 dólares, tienen una razón energía-costos de 205 joules por dólar, o ¡175 000 veces el costo de la electricidad en el hogar!



© Gerald F. Wheeler



**Figura 11-14** Un esquema de un interruptor de tres vías. El cable de la izquierda se conecta a cualquiera de los cables de la derecha al mover el interruptor.

### FÍSICA | HÁGALO USTED MISMO

Obtenga dos interruptores de tres vías utilizados para conectar las luces de un pasillo. (Los interruptores funcionan como el de la figura 11-14.) Conéctelos a una batería de linterna y a un bombillo para que cualquier cable pueda encender o apagar la luz, independientemente del otro. Compruebe que no haya cortocircuitos cuando se apague la luz.

Algunas luces de árboles de Navidad modernas se conectan en paralelo. Si un bombillo se funde, es el único que se apaga. Las antiguas se conectaban en serie; cuando se apagaba un bombillo, los demás también lo hacían. Esto era bastante inconveniente, porque cuando se fundía un bombillo, era necesario probar todos, hasta encontrar el defectuoso. El estilo más reciente de las luces de árbol de Navidad tienen los bombillos conectados en serie, pero cuando uno se quema, se forma un cortocircuito a través del quemado, lo cual permite que los demás permanezcan encendidos.

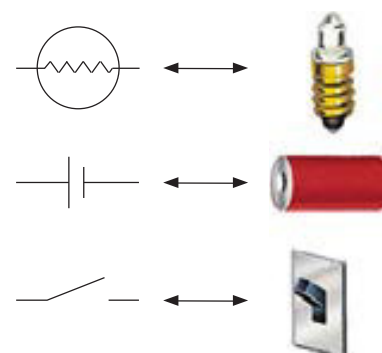
Con el paso de los años, se ha desarrollado una convención para dibujar los elementos de un circuito. Igual que todos los símbolos, los símbolos eléctricos cap-

turan la esencia funcional del elemento y omiten las características no esenciales. Por ejemplo, un bombillo no tiene una característica direccional, pero una batería, sí. Sus símbolos reflejan esta diferencia. La figura 11-15 presenta los símbolos comunes, junto con un diagrama como los que hemos utilizado.

Los circuitos también se dibujan con esquinas más pronunciadas que las que existen en los circuitos reales. Ésta es sólo una técnica que ha servido para la comunicación entre los experimentadores.

## Energía eléctrica

Cuando compra electricidad, adquiere energía. Esta energía eléctrica se convierte en calor, luz, o movimiento. Entonces, ¿por qué hablamos de potencia? Como analizamos en el capítulo 6, la **potencia** es la cantidad de energía utilizada en una unidad de tiempo. Pero necesitamos tener cuidado aquí; la conservación de la energía nos dice que ésta no puede crearse ni destruirse. De manera formal, la potencia es la cantidad de energía transformada de una forma a otra, dividida entre el tiempo transcurrido. En la electricidad, la energía que adquieren los electrones desde el campo eléctrico se convierte a formas como energía cinética, calorífica, de sonido, y lumínica. Casi todos los aparatos eléctricos en nuestros hogares se miden por su uso de la potencia. La potencia se mide en **watts** (W). Muchos bombillos para casa se clasifican en 60, 75, o 100 watts. Los calefactores eléctricos y las secadoras de pelo pueden utilizar 1500 watts.



**Figura 11-15** Los símbolos comunes utilizados en los diagramas de los circuitos eléctricos. (De arriba abajo: resistor, batería, interruptor.)



Cortesía de © Marc Sherman

Este medidor eléctrico determina la energía utilizada en una casa o un negocio. Este medidor indica 65 401 kilowatts-hora.

### FÍSICA | HÁGALO USTED MISMO

Vigile el uso de la energía eléctrica en su casa al efectuar lecturas periódicas de su medidor. ¿Cuánta electricidad utiliza su hogar en un día normal?

Trate de apagar todos los aparatos eléctricos en su casa. Puede vigilar su avance al observar la rapidez con que gira el disco de su medidor eléctrico. Si tiene una secadora de ropa eléctrica, enciéndala y vea cuán rápido gira el disco.

## SOLUCIÓN | Energía eléctrica



Obtenemos una expresión para la energía eléctrica al utilizar la definición que desarrollamos en el capítulo 10 y la definición para la corriente. Como la energía es la carga multiplicada por el voltaje, tenemos

$$P = \frac{\Delta E}{\Delta t} = \frac{\Delta QV}{\Delta t} = \frac{\Delta Q}{\Delta t} V$$

Esta ecuación nos dice que la potencia es igual a la corriente por el voltaje:

$$P = IV$$

Por lo tanto, un aparato eléctrico que toma una corriente de 10 A a un voltaje de 110 volts, utiliza energía a una velocidad de

$$P = IV = (10 \text{ A})(110 \text{ V}) = 1100 \text{ W}$$

**Pregunta** ¿Cuánta energía se requiere para accionar un radio reloj que emplea 0.05 A del circuito de la casa?

**Respuesta**  $P = IV = (0.05 \text{ A})(110 \text{ V}) = 5.5 \text{ W}$

◀ potencia = corriente × voltaje

continúa en la página siguiente



Al reorganizar la expresión para la potencia, puede determinar la corriente que atraviesa un bombillo de 100 W:

$$I = \frac{P}{V} = \frac{100 \text{ W}}{110 \text{ V}} = 0.91 \text{ A}$$

Obtenemos una expresión alterna para la potencia eléctrica al utilizar la relación de que el voltaje es igual a la corriente multiplicada por la resistencia

$$P = IV = I(IR) = I^2R$$

potencia = corriente al cuadrado  $\times$    
 resistencia

En esta forma es más obvio por qué resplandece un bombillo en un circuito, aunque los cables de conexión, no. La corriente que atraviesa el circuito es igual en todas partes, pero la sección que tiene la resistencia más alta recibe la mayor parte de la energía térmica por unidad de tiempo. Debido a que el filamento está hecho de un cable muy fino de material de alta resistencia, tiene la resistencia más alta; su temperatura aumenta, y resplandece. Los cables de conexión también se calientan, pero no lo suficiente para resplandecer o ni siquiera para sentirse calientes.

El medidor eléctrico conectado entre su casa y la compañía que distribuye electricidad registra la energía que usted usa, de manera similar a como el odómetro de su vehículo registra los kilómetros que conduce. La energía eléctrica se suele facturar entre 8 y 25¢ de dólar por kilowatt-hora. Un hogar común con un horno eléctrico y una secadora de ropa eléctrica (pero sin calefactor eléctrico) emplea unos 900 kilowatts-hora por mes.

Hay veces en que las pérdidas de energía en los cables de conexión se vuelven importantes. El envío de energía eléctrica por distancias grandes a través de cables desde una planta eléctrica puede provocar pérdidas de energía significa-



## SOLUCIÓN | Costo de la energía eléctrica

Un aparato que funciona con una energía constante emplea una cantidad de energía igual a la energía multiplicada por el tiempo; entre más tiempo lo utilizemos, más energía consume. Por ejemplo, un bombillo de 60 W que funciona durante 10 h utiliza

$$\Delta E = P\Delta t = (60 \text{ W})(10 \text{ h}) = 600 \text{ Wh} = 0.6 \text{ kWh}$$

de energía eléctrica. Es importante no perder de vista que un kilowatt-hora (kWh) es una unidad de energía, no de potencia. Debido a que 1 kW es igual a 1000 J/s y 1 h equivale a 3600 s, 1 kWh son 3.6 millones de joules.

Ahora podemos calcular el costo mensual de la energía eléctrica para esta casa común que utiliza 900 kWh por mes. Supongamos que la energía eléctrica cuesta 10¢ por kWh:

$$\text{costo} = (900 \text{ kWh})(\$0.10/\text{kWh}) = \$90$$

**Pregunta** A este precio, ¿cuánto costaría hacer funcionar un calefactor de 1500 W de manera continua durante una noche de 8 h?

**Respuesta**  $E = Pt = (1500 \text{ W})(8 \text{ h}) = 12\,000 \text{ Wh} = 12 \text{ kWh}$ . Costo =  $(12 \text{ kWh})(10¢/\text{kWh}) = \$1.20$ .



tivas. Se pueden hacer dos cosas para reducir estas pérdidas. En primer lugar, los cables deben tener la menor resistencia posible, lo cual significa que se emplean cables de diámetro grande y materiales de resistencia baja. En segundo lugar, los transformadores (que se analizan en el capítulo 12) permiten que la compañía de electricidad envíe la misma energía a través del cable al aumentar el voltaje y, al mismo tiempo, reducir la corriente. Una corriente más baja significa menos pérdida térmica en las líneas de transmisión. Algunas consideraciones económicas y de ingeniería determinan el grado en que se utiliza cada uno de estos métodos para reducir la pérdida de energía. La electricidad se transmite entre las compañías de electricidad y las poblaciones a voltajes muy altos (hasta 765 000 volts). Los transformadores reducen el voltaje para su distribución en las poblaciones y después lo reducen una vez más a los 110 volts más seguros que se utilizan en los hogares.

## Resumen

Volta empleó la diferencia de potencial eléctrico entre dos metales distintos para construir la primera batería. Las baterías hacen que las cargas fluyan de manera continua como una corriente, y que produzcan calor y luz y accionen motores y otros aparatos.

El voltaje producido por una pila individual depende de los materiales utilizados, pero no de su tamaño. El tamaño determina la cantidad de químicos que contiene la pila y, por lo tanto, la cantidad total de la carga que se puede transferir. Los voltajes, de las pilas en serie se suman. Las pilas colocadas en paralelo no aumentan el voltaje, sino el tamaño efectivo de la batería.

La electricidad en los hogares suele suministrarse a 110 volts y una corriente alterna de 60 hertz. La electricidad de una batería es una corriente directa y normalmente está en un voltaje mucho menor.

La resistencia de los cables aumenta al mismo tiempo que la longitud, disminuye cuando se incrementa un área transversal, y depende del tipo de material. La resistencia  $R$  es la razón del voltaje  $V$  que atraviesa un objeto entre la corriente  $I$  que va de un lado a otro del objeto,  $R = V/I$ . La resistencia se mide en volts por amperes, u ohms ( $\Omega$ ).

Las cargas eléctricas sólo pueden fluir de manera continua cuando existe una trayectoria de conducción, o circuito, hecha de materiales conductores. El voltaje y la resistencia total del circuito,  $V = IR$ , determinan la corriente. El voltaje entre dos puntos en un circuito es igual al cambio en el potencial eléctrico entre estos dos puntos, el cual es el trabajo efectuado al mover una unidad de carga positiva por el circuito. La mayor parte de la carga fluye por la trayectoria que tiene la menor resistencia. La conservación de la carga requiere que la electricidad salga por un extremo de la batería y regrese por el otro. La carga no se pierde ni se agota sobre la trayectoria.

La conservación de la energía exige que una carga que adquiere cualquier energía eléctrica potencial mientras atraviesa la batería debe perder esa energía mientras pasa por el circuito. La caída del voltaje a través de los elementos resistivos sobre cualquier trayectoria entre las terminales de una batería debe ser igual a la suma del voltaje de la batería.

Uno o ambos tipos de carga pueden estar en libertad de moverse en un conductor. En los plasmas y los líquidos y los gases ionizados, ambas cargas se pueden mover, aunque sólo algunos de los electrones cargados negativamente se muevan en los metales. Para casi todos los efectos macroscópicos, las cargas positivas que se mueven en una dirección equivalen a las cargas negativas que se desplazan en la dirección opuesta.

Una compañía de electricidad vende energía, no potencia. La potencia es la velocidad a la que se usa la energía y sirve para clasificar casi todos los aparatos eléctricos de nuestros hogares. La energía se mide en watts (W) o kilowatts (kW), en tanto que el uso de la energía eléctrica en el hogar se mide en kilowatts-hora (kWh).

# Capítulo 11



## Revisión

Cuando los electrones atraviesan un conductor, chocan con los átomos del conductor, aumentan la energía cinética de los átomos y, por lo tanto, la temperatura del conductor. El aumento en la temperatura depende de las propiedades térmicas del material y de su resistencia eléctrica. Los filamentos de los bombillos están hechos de cables muy delgados de materiales de alta resistencia para mejorar el calentamiento. Si el aumento en la temperatura es lo bastante grande, el cable resplandece, y emite luz.

## TÉRMINOS IMPORTANTES

**ampere:** La unidad de corriente eléctrica en el Sistema Internacional, 1 coulomb por segundo.

**circuito completo:** Una trayectoria de conducción continua desde un extremo de una batería (u otras fuentes de potencial eléctrico) hasta el otro extremo de la batería.

**corriente:** Un flujo de carga eléctrica. Se mide en amperes.

**cortocircuito:** Una trayectoria en un circuito eléctrico que tiene muy poca resistencia.

**coulomb:** La unidad de carga eléctrica en el Sistema Internacional. La cantidad de carga que atraviesa un punto específico en un conductor que transfiere una corriente de 1 ampere.

**en paralelo:** Dos elementos de un circuito se conectan en paralelo cuando la corriente puede fluir a través de uno u otro, pero no de ambos. Los elementos conectados en paralelo entre sí se conectan directamente entre sí en ambas terminales.

**en serie:** Una distribución de las resistencias (o las baterías) en una sola trayectoria de conducción, para que la corriente fluya por cada elemento.

**ley de Ohm:** La resistencia de un objeto es igual al voltaje que lo atraviesa dividido entre la corriente de un lado a otro.

**ohm:** La unidad de resistencia eléctrica en el Sistema Internacional. Una corriente de 1 ampere fluirá por una resistencia de 1 ohm bajo 1 volt de diferencia de potencial.

**potencia:** La velocidad con la que la energía se convierte de una forma a otra. En los circuitos eléctricos, esta energía es igual a la corriente por el voltaje. Se mide en joules por segundo, o watts.

**regla de los nodos de Kirchhoff:** La suma de las corrientes que entran a cualquier nodo en un circuito debe ser igual a la suma de las corrientes que salen de ese nodo.

**regla del bucle de Kirchhoff:** Sobre cualquier trayectoria desde la terminal positiva hasta la terminal negativa de una batería, las caídas de voltaje a través de los elementos resistivos que se encuentran, deben ser iguales al voltaje de la batería.

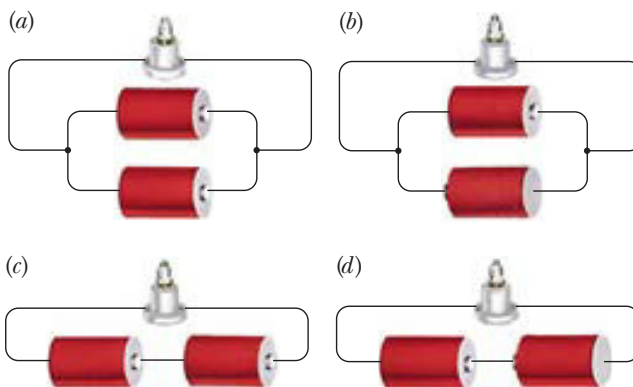
**resistencia:** La impedancia del flujo de una corriente eléctrica. La resistencia es igual al voltaje que atraviesa el objeto dividido por la corriente de un lado al otro. Se mide en volts por amperes, u ohms.

**watt:** La unidad de potencia en el Sistema Internacional, 1 joule por segundo.

## PREGUNTAS CONCEPTUALES

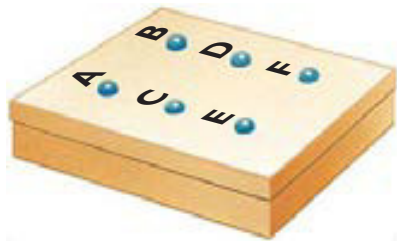
1. ¿El tamaño de una pila afecta su voltaje, su duración, o la corriente que produce?
2. Cuando apila tres baterías de linterna en la misma dirección, obtiene un voltaje de  $3 \times 1\frac{1}{2} \text{ volts} = 4\frac{1}{2} \text{ volts}$ . ¿Cuál voltaje obtiene si una de las baterías se voltea en la dirección opuesta?
3. Tiene dos baterías de 9 volts. ¿Cuál voltaje obtendría si las conectara en serie?
4. Si tiene cuatro pilas de 1.5 volts, ¿cuál voltaje obtendría si las conectara en paralelo?
5. ¿Cuáles son las diferencias y las semejanzas de la electricidad proporcionada por una batería de linterna y una batería de automóvil?
6. ¿Cuáles son las diferencias y las semejanzas de la electricidad proporcionada por una batería de automóvil y la compañía de electricidad de su ciudad?
7. ¿Cuáles bombillos de la figura resplandecen más? ¿Cuáles están más atenuados, pero todavía resplandecen? ¿Por qué?
8. ¿Cuáles bombillos de la figura no encienden? Explique.

9. ¿Cuáles disposiciones de baterías de la figura se agotarán más rápido? ¿Cuál durará más? ¿Por qué?
10. ¿Cuáles disposiciones de baterías de la figura iluminarán el bombillo durante más tiempo? Explique.



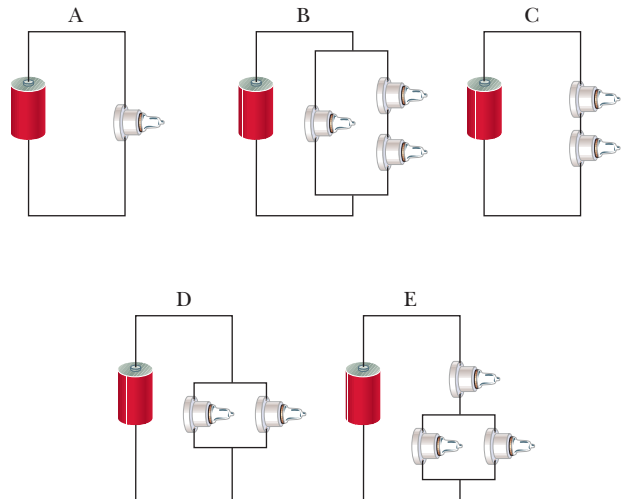
**Preguntas 7-10** Bombillos idénticos están conectados a diferentes combinaciones de baterías idénticas.

11. Existen cuatro modos distintos de conectar una batería, un bombillo y un cable, de modo que el bombillo se encienda. Dos de ellos se presentan en la figura 11-5. ¿Cuáles son los otros dos?
12. Redacte una breve declaración que describa cómo conectaría una batería, un bombillo y un cable único de modo que el bombillo se encienda. Su declaración debe incluir las cuatro maneras, sin preferir una.
13. ¿Cuál es la diferencia en un circuito, de haberla, entre un bombillo que se funde y el retiro del bombillo de su portálámparas?
14. Suponga que tiende cables de un altavoz del estéreo en la sala a su recámara, pero olvida marcar los cables. ¿Qué puede hacer para saber cuáles cables debe conectar a cuál altavoz?
- ▲ 15. Recibe una caja misteriosa con seis cabezas de pernos en la parte superior, iguales a las de la figura. Conecta una batería y un bombillo a través de cada par de cabezas de pernos y encuentra que el bombillo enciende para los pares siguientes: AB, CF, CE y EF, pero no para cualquiera de las otras combinaciones. Dibuje diagramas que muestren todos los modos en que se puede conectar la caja.



- ▲ 16. Un amigo examina una caja similar a la de la pregunta 15 y encuentra que el bombillo sólo enciende para las combinaciones siguientes: AB, CD y DE. ¿Pueden ser correctas las observaciones de su amigo? Explique.
17. ¿Cuál es la diferencia entre un volt y un amperio?
18. ¿Las baterías de automóvil se suelen clasificar en amperes-horas. ¿Qué significa esto?
19. En el modelo para el agua de la electricidad, ¿cuáles son los análogos de una batería, un interruptor, un cable y un bombillo?
20. En el modelo para el agua de la electricidad, ¿cuáles son los análogos de la carga, la corriente y el voltaje?
21. ¿Cuáles de los siguientes afectan la resistencia de un cable: el diámetro, el tipo de metal, la longitud, o la temperatura? Explique.
22. Algunas herramientas eléctricas funcionan de manera deficiente cuando se conectan a cables extensores muy largos. ¿Por qué? ¿Qué puede hacer para mejorar la situación?
23. Si la resistencia conectada a una batería se reduce a la mitad, ¿qué le sucede a la corriente que atraviesa la batería?
24. Un resistor tiene una corriente de 2 amperes cuando se conecta a una sola batería. Si se conecta una segunda batería idéntica en serie con la primera, ¿cuál corriente atraviesa el resistor? ¿Cuál es la corriente si las baterías se conectan en paralelo?
25. ¿Cómo explica la teoría atómica de la materia la observación de que la resistencia de los cables metálicos aumenta con la temperatura?
26. ¿Por qué es peligroso emplear una secadora al tomar un baño?

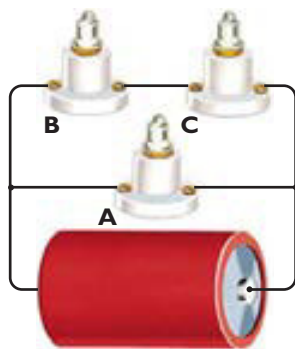
27. Si el único voltaje que tiene es 110 volts, ¿cómo pueden encender algunos bombillos de 5 volts sin fundirlos?
28. En Inglaterra, el voltaje suministrado a los hogares es 240 volts. ¿Qué podría ocurrir si utilizara un bombillo estadounidense en Inglaterra?
29. En un circuito con un solo bombillo, se determina que la corriente que atraviesa el bombillo es de 2 volts. ¿La corriente que atraviesa la batería es mayor, igual, o menor que 2 amperes? Explique.
30. Dos bombillos en serie se conectan a una batería. Se encuentra que la corriente que atraviesa el primer bombillo es 1 amperio. ¿Cuál es la corriente que atraviesa la batería?
31. Si se agrega un segundo bombillo a un circuito con un solo bombillo, ¿la resistencia del circuito aumenta, disminuye, o permanece igual? ¿La corriente que atraviesa la batería aumenta, disminuye, o permanece igual? ¿Por qué?
32. Cuando se añade un bombillo en paralelo a un circuito con un solo bombillo, ¿la resistencia del circuito aumenta, disminuye, o permanece igual? ¿La corriente aumenta, disminuye, o permanece igual? ¿Por qué?
33. Si una fila de cinco bombillos en serie se incorpora en paralelo a un solo bombillo conectado a una batería, encuentra que el resplandor del bombillo original no cambia. ¿La corriente que atraviesa la batería aumentó, disminuyó, o permaneció igual? ¿La resistencia del circuito aumentó, disminuyó, o permaneció igual? Explique.
34. ¿Cuál circuito ofrece mayor resistencia a la batería, dos bombillos en serie, o dos bombillos en paralelo? ¿Por qué?
35. Para los circuitos de la figura, ¿la corriente que atraviesa la batería en el circuito A es mayor, igual o menor que la corriente que atraviesa la batería en el circuito E? Explique su razonamiento.



**Preguntas 35-38** Baterías idénticas están conectadas a diversas combinaciones de bombillos idénticos.

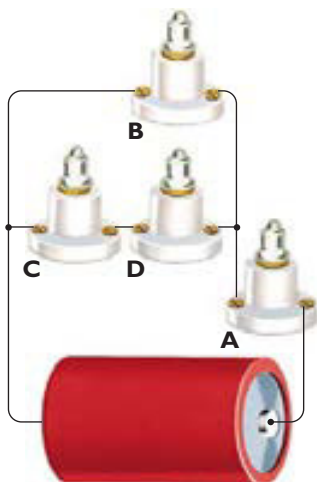
36. Para los circuitos de la figura, ¿la corriente que atraviesa la batería en el circuito A es mayor, igual, o menor que la corriente que atraviesa la batería en el circuito B? Explique su razonamiento.
37. Para los circuitos de la figura, ¿la corriente que atraviesa la batería en el circuito C es mayor, igual, o menor que la corriente que atraviesa la batería en el circuito E? Explique su razonamiento.

38. Para los circuitos de la figura, ¿la corriente que atraviesa la batería en el circuito D es mayor, igual, o menor que la corriente que atraviesa la batería en el circuito E? Explique su razonamiento.
39. ¿Cómo conectaría dos baterías y dos bombillos para obtener el máximo de luz?
40. ¿Cómo conectaría dos baterías y dos bombillos para producir luz durante más tiempo?
41. En la figura, ¿cuáles bombillos resplandecen más y cuáles están más atenuados? Explique.



Preguntas 41-46

42. ¿La resistencia del circuito de la figura aumentaría, disminuiría o permanecería igual si el bombillo A se quitara de su portalámparas? ¿Y si en lugar de eso se quitara el bombillo C? Explique.
43. ¿Qué le ocurre al resplandor de los bombillos B y C de la figura cuando el bombillo A se funde? Explique.
44. ¿Qué le ocurre al resplandor de los bombillos A y C de la figura cuando el bombillo B se quita de su portalámparas? Explique.
45. Si pone un cable a través de las dos terminales del bombillo A, ¿qué le ocurre al resplandor de cada bombillo de la figura? ¿Por qué?
46. ¿Qué le sucede al resplandor de cada bombillo de la figura cuando conecta un cable a través de las terminales del bombillo B?
47. ¿Cómo se compara el resplandor del bombillo C con el resplandor del bombillo D de la figura? Explique su razonamiento.



Preguntas 47-52

48. ¿Cómo se compara el resplandor del bombillo D con el resplandor del bombillo B de la figura? Explique su razonamiento.
49. ¿Qué le ocurre al resplandor de los bombillos B, C y D de la figura cuando se funde el bombillo A? Explique.
50. ¿Qué le ocurre al resplandor de los bombillos A, B y C de la figura cuando el bombillo D se quita de su portalámparas? Explique.
51. Si pone un cable a través de las dos terminales del bombillo A, ¿qué le ocurre al resplandor de cada bombillo de la figura? ¿Por qué?
52. ¿Qué le sucede al resplandor de cada bombillo de la figura cuando conecta un cable a través de las terminales del bombillo B?
- ▲ 53. Una caja tiene tres bombillos idénticos montados en su parte superior, con los cables ocultos en el interior. Al principio, el bombillo A tiene el máximo resplandor, y los bombillos B y C tienen bastante resplandor. Si desenrosca el A, los bombillos B y C se apagan. Si desenrosca el B, el A se atenúa y el C resplandece más, de modo que el A y el C resplandecen igual. Si desenrosca el C, el A se atenúa y el B resplandece más, de modo que el A y el B resplandecen igual. Si desenrosca el B y el C, el A se apaga. ¿Cómo están conectados los bombillos?
- ▲ 54. Una caja tiene tres bombillos idénticos montados en su parte superior, con los cables ocultos en el interior. Al principio, el bombillo A tiene el máximo resplandor, y los bombillos B y C resplandecen igual. Si desenrosca el A, los bombillos B y C permanecen igual. Si desenrosca el B, el A permanece igual y el C se apaga. Si desenrosca el C, el A permanece igual y el B se apaga. Si desenrosca el B y el C, el A permanece igual. ¿Cómo están conectados los bombillos?
55. ¿Los faros de los automóviles y los camiones están conectados en serie o en paralelo? Explique.
56. ¿Por qué no debe reemplazar en su automóvil un fusible de 5 amperes con un fusible de 10 amperes?
57. ¿Qué le sucede a la energía suministrada a una batería si se duplica la resistencia conectada a la batería? Explique.
58. Un resistor único disipa 4 watts de energía cuando se conecta directamente a través de una batería. Si se agrega en serie un segundo resistor idéntico al primero, ¿cuánta energía disipará el resistor?
59. Un resistor único disipa 4 watts de energía cuando se conecta a una sola batería. Si se conecta una segunda batería idéntica, en paralelo con la primera, ¿cuánta energía disipará el resistor?
60. Un resistor único disipa 4 watts de energía cuando se conecta a una sola batería. Si se conecta una segunda batería idéntica en serie con la primera, ¿cuánta energía disipará el resistor?
61. Dos bombillos tienen clasificaciones de 60 watts y 120 watts. ¿Cuál bombillo traslada la corriente más alta? Explique.
- ▲ 62. Dos bombillos tienen clasificaciones de 60 watts y 120 watts. ¿Cuál bombillo tiene la resistencia más alta? Explique.

## EJERCICIOS

1. ¿Cuál es la resistencia de un bombillo que atrae 0.8 A cuando se conecta en un tomacorriente de 110 V?
2. Conecta una aspiradora a un tomacorriente de 110 V con nada más en el circuito. Si activa el interruptor de corriente del circuito de 15 A, ¿cuál es la máxima resistencia posible del motor de la aspiradora?
3. Las bobinas de un calefactor tienen una resistencia de  $12\ \Omega$  cuando están calientes. ¿Cuánta corriente atrae el calefactor cuando se conecta en un tomacorriente de 110 V?
4. Usted conecta su nueva secadora de pelo de  $8\ \Omega$  a un tomacorriente de 110 V y activa el interruptor del circuito de 10 A. Si conecta la secadora en una línea con un interruptor de 15 A, ¿se activará el interruptor? Suponga que no hay nada más conectado en ninguno de los circuitos
5. Si un bombillo tiene una resistencia de  $8\ \Omega$  y una corriente de 0.5 A, ¿en cuál voltaje opera?
6. Un bombillo tiene una resistencia de  $250\ \Omega$ . ¿Cuál voltaje se requiere para que el bombillo atraiga una corriente de 0.5 A?
7. Dos baterías de  $1\frac{1}{2}\text{ V}$  se conectan en serie a un resistor de  $6\ \Omega$ . ¿Cuánta corriente fluye por cada batería?
8. Dos baterías de  $1\frac{1}{2}\text{ V}$  se conectan en paralelo a un resistor de  $6\ \Omega$ . ¿Cuánta corriente fluye por cada batería?
9. Dos resistores de  $3\ \Omega$  se conectan en serie a una batería de 12 V. ¿Cuál resistor único, si se conecta sólo a la batería (llamado la *resistencia equivalente*), atraería esta misma corriente? ¿Cuánta corriente atraviesa la batería?
10. Un resistor de  $2\ \Omega$  y uno de  $4\ \Omega$  se conectan en serie a una batería de 12 V. ¿Cuánta corriente atraviesa cada resistor? Utilice la ley de Ohm para mostrar que la caída del voltaje a través de los resistores individuales suma 12 V.
11. Dos resistores de  $4\ \Omega$  se conectan en paralelo a una batería de 12 V. Utilice el hecho de que el voltaje que atraviesa cada resistor es de 12 V para determinar la corriente total que atraviesa la batería. ¿Cuál resistor único, si se conecta a la batería sola (llamado la *resistencia equivalente*), atraería esta misma corriente?
12. Un resistor de  $2\ \Omega$  se conecta en paralelo a un resistor de  $12\ \Omega$  y la combinación se conecta a una batería de 12 V. ¿Cuánta corriente suministra la batería?
13. ¿Cuál es la energía utilizada por una tostadora que atrae una corriente de 7 A cuando se conecta a una línea de 110 V?
14. Un elemento calefactor se clasifica en 1500 W. ¿Cuánta corriente atrae cuando se conecta a una línea de 110 V?
15. Si un reloj atrae una corriente máxima de 5 mA de una línea de 110 V, ¿cuál es su consumo de energía máximo?
16. Una VCR tiene una clasificación de energía máxima de 24 W cuando se conecta a un tomacorriente de 110 V. ¿Cuál es la corriente máxima que requiere?
17. Un resistor de  $4\ \Omega$  se conecta a una batería de 12 V. ¿Cuánta corriente atraviesa la batería? ¿Cuánta energía disipa el resistor?
18. Un resistor de  $3\ \Omega$  atrae una corriente de 4 A cuando se conecta a una batería de un voltaje desconocido. ¿Cuál es el voltaje de la batería? ¿Cuánta energía disipa el resistor?
19. ¿Cuál es la clasificación de energía de una bobina calefactora con una resistencia de  $11\ \Omega$  que atrae una corriente de 20 A?
20. Una cafetera tiene una resistencia de  $10\ \Omega$  y atrae una corriente de 11 A. ¿Cuánta energía utiliza?
- ▲ 21. ¿Cuál es la resistencia de un bombillo de 60 W en un circuito de 110 V?
- ▲ 22. ¿Cuál es la resistencia de la bobina en un calefactor de 1400 W?
23. Si una secadora de pelo se clasifica en 1200 W, ¿cuánta energía se utiliza para accionarla durante 8 minutos?
24. Si se deja encendido un bombillo de 60 W en un pasillo aislado, ¿cuánta energía utiliza cada mes?
25. Si la electricidad cuesta 15¢/kWh, ¿cuánto cuesta encender un bombillo de 100 W durante un día?
26. Un calefactor de 1400 W para un sauna requiere 40 minutos para calentarlo a  $190^\circ\text{F}$ . ¿Cuánto cuesta esto si la electricidad se vende a 15¢/kWh?



# 12 Electromagnetismo

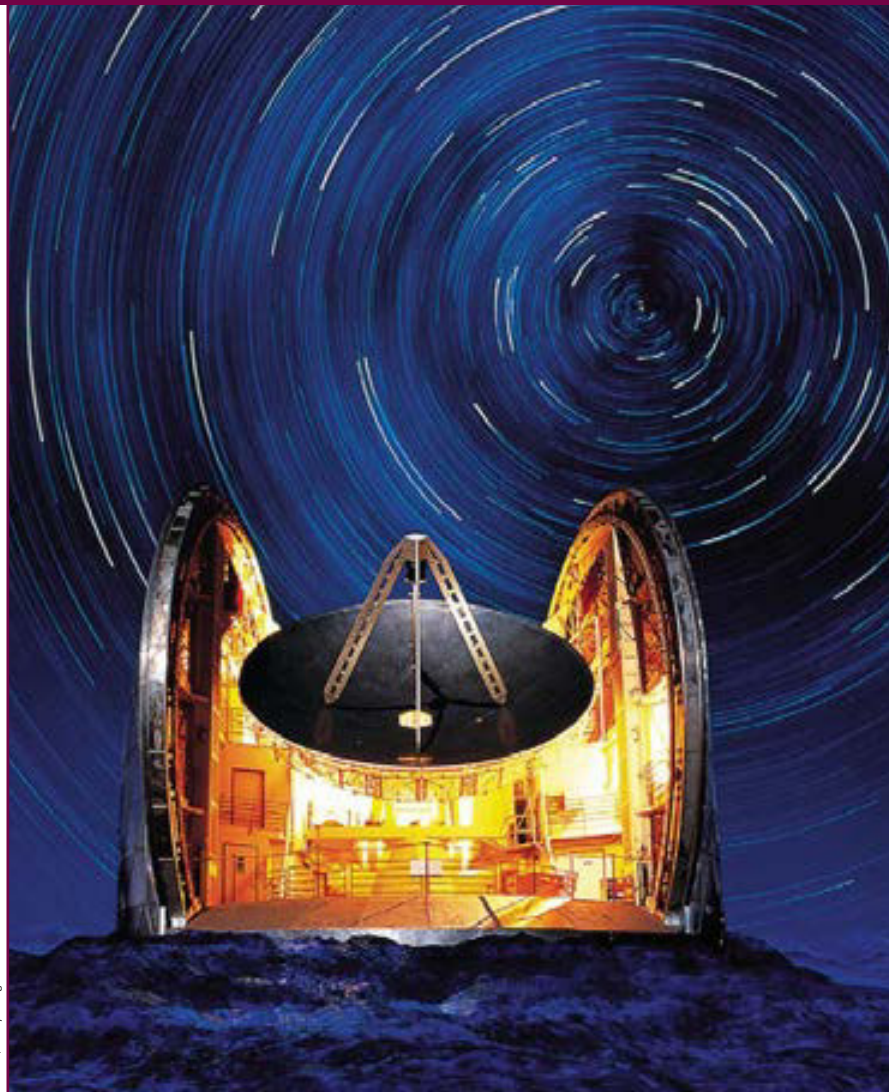
Durante el siglo XIX, los científicos descubrieron que la electricidad y el magnetismo no eran fenómenos separados, sino dos aspectos diferentes de algo llamado electromagnetismo. El electromagnetismo hace estallar el maíz en nuestros hornos de microondas y hace posible que veamos la televisión mientras disfrutamos nuestras palomitas de maíz. ¿Cuál es esta conexión entre la electricidad y el magnetismo?

---

(Consulte la respuesta a esta pregunta en la página 240.)

---

© Taxi/Getty Images



*Un radiotelescopio explora el cielo sobre Hawai.*

Casi todos hemos jugado con imanes. Por medio del juego aprendemos que estos pedacitos de material se atraen y repelen entre sí y atraen algunos objetos, pero no afectan a otros. Por ejemplo, los imanes se pegan en las puertas de los refrigeradores, pero no en las paredes de una habitación; en los sujetadores de papeles, pero no en los papeles; y así sucesivamente.

Aunque las propiedades magnéticas son interesantes, parecen ser, igual que la electricidad, fenómenos bastante aislados. Sin embargo, a diferencia de la electricidad, el magnetismo parece más permanente. Y aunque existen semejanzas entre estos dos fenómenos, parecen ser propiedades de la materia separadas: un imán sin una carga eléctrica neta no afecta las hojas de un electroscopio. De modo que el magnetismo parece ser un fenómeno diferente de la electricidad. No obstante, algunos experimentadores en el siglo XVII estaban más fascinados por las semejanzas que las diferencias entre el magnetismo y la electricidad, y buscaban una conexión.

## Imanes

Se sabía desde cuando menos el siglo VI a.C. que la piedra imán, un mineral que aparece en la naturaleza, atrae el hierro. También se sabía que el hierro se magnetiza al frotarlo con la piedra imán. A su vez, el pedazo de hierro magnetizado atrae otros pedazos de hierro. Los únicos elementos que ocurren de manera natural en el estado magnetizado son el hierro, el níquel y el cobalto. Muchos imanes permanentes se hacen con aleaciones de estos metales.

### FÍSICA | HÁGALO USTED MISMO

Examine diferentes materiales y compile una lista de los que son atraídos por los imanes. ¿Su lista es igual que la de los conductores que encontró en el capítulo 10?

Imagine que tiene tres barras magnetizadas, sin marcas. Si arbitrariamente marcamos un extremo de una de las barras con una X, encontramos que atrae un extremo de cada uno de los otros dos imanes (figura 12-1) y que repele los otros extremos. Marquemos esos extremos con una A (atraer) y con una R (repeler), respectivamente. A continuación, determinamos que los dos extremos A se repelen entre sí, los dos extremos R se repelen entre sí, y los extremos A y R se atraen. Debido a que los dos extremos A se determinaron de la misma manera con el primer imán, deben ser *similares*. Por lo tanto, los extremos de los imanes (llamados **polos magnéticos**) se comportan igual que las cargas eléctricas analizadas en el capítulo 10. Podemos resumir el comportamiento de los polos magnéticos con la sencilla afirmación de que

Los polos iguales se repelen; los polos diferentes se atraen.

La electricidad y el magnetismo parecen tener dos tipos de “cargas”. Sin embargo, en la electricidad es posible separar las dos cargas o, cuando menos, poner más de un tipo de carga en un objeto que en el otro. Pero en el magnetismo, los polos siempre vienen en pares que tienen la misma fuerza.

**Pregunta** ¿Cómo podría buscar un tercer tipo de polo magnético?

**Respuesta** Puede buscar un material magnetizado que atraiga o repele los dos polos norte y los dos polos sur. No se ha descubierto tal material.



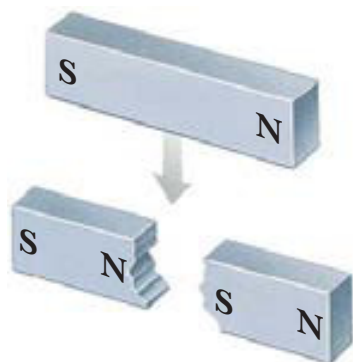
Una colección de imanes permanentes.



**Figura 12-1** Los polos magnéticos se identifican por su atracción y repulsión de los polos conocidos.

◀ imanes





**Figura 12-2** La división de un imán produce dos imanes más pequeños, cada uno con ambos polos.

Suponga que intenta separar los polos al romper un imán por la mitad. Obtiene dos imanes, y cada uno de estos imanes nuevos tiene dos polos (figura 12-2). Si, a su vez, divide cada uno de éstos a la mitad, obtiene cuatro imanes, y así sucesivamente. Incluso si los sigue dividiendo hasta el nivel atómico, siempre obtiene imanes con dos polos. No parece posible aislar un polo magnético único, un **monopolo magnético**. Se han efectuado muchas búsquedas extensas de monopolos magnéticos. Aunque las teorías actuales establecidas no han descartado la existencia de un monopolo magnético, todas las búsquedas han terminado en fracasos y no parece probable que se descubra uno. Es muy probable que al descubridor de un monopolo magnético le otorgaran el premio Nobel.

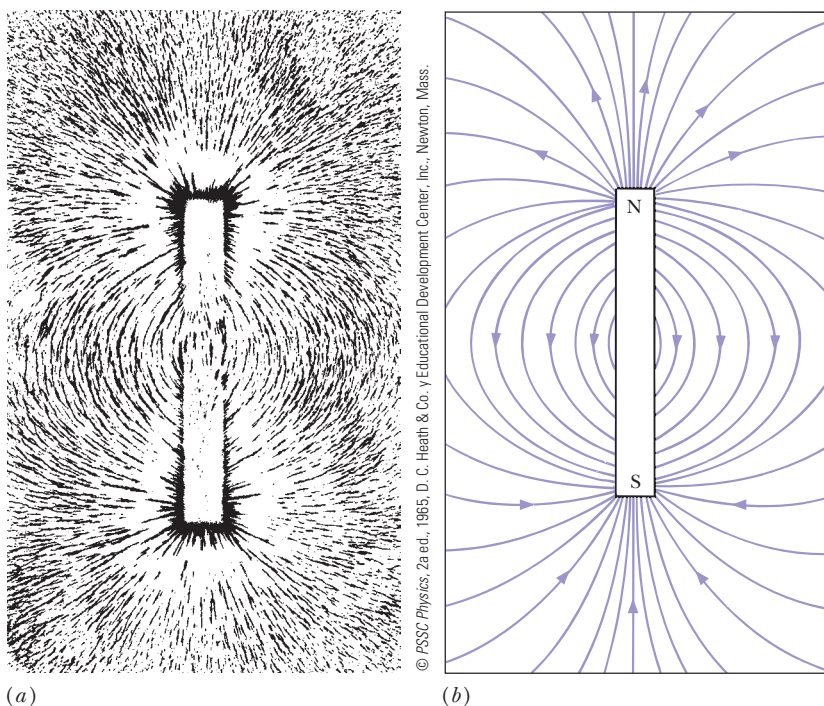
Al designar los extremos, o polos, de los imanes, utilizamos la observación de que un imán que se balancea libremente se alinea sobre la dirección norte-sur. El extremo que apunta al norte se llama *norte*, y el otro, *sur*. Las brújulas utilizadas para la navegación sencillamente son imanes diminutos que giran libremente. Los imanes se han utilizado como brújulas desde el siglo XI, pero no fue hasta el año 1600 que William Gilbert, un físico inglés, planteó que funcionan porque la Tierra misma es una piedra imán gigante. Gilbert incluso dio forma esférica a un pedazo de piedra imán para mostrar que una brújula colocada cerca se comportaba igual que en la Tierra.

### FÍSICA | HÁGALO USTED MISMO

Puede hacer una brújula sencilla al magnetizar una aguja de costura y colocarla sobre un corcho que flote sobre un vaso con agua. La aguja se magnetiza al frotarla con un imán.

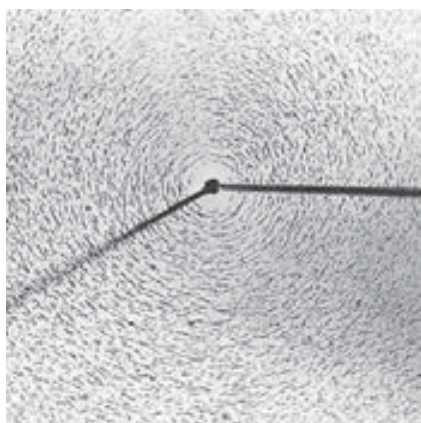
Los imanes están rodeados por **campos magnéticos** del mismo modo que las cargas eléctricas están rodeadas por campos eléctricos. Estos campos magnéticos se detectan mediante una brújula pequeña. La dirección de un campo magnético en un punto específico es la dirección en la que apunta el polo norte de la brújula cuando se coloca en este punto, y la torsión que alinea la brújula es una medida de la intensidad del campo magnético. La fotografía de la figura 12-3 (a) se obtuvo al

**Figura 12-3** (a) La limadura de hierro se alinea sobre las líneas del campo magnético que rodean un imán en barra. (b) El dibujo indica la dirección del campo magnético fuera del imán.

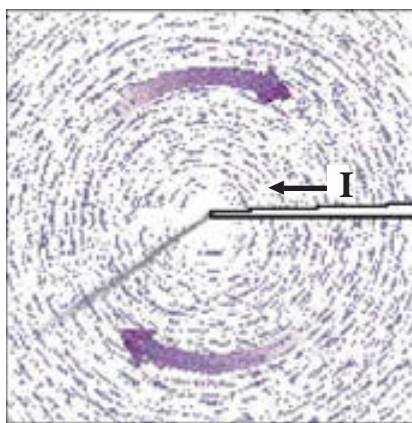


(a)

(b)



(a)



(b)

**Figura 12-4** (a) La limadura de hierro muestra que las líneas del campo magnético que rodean un cable recto que transporta corriente son círculos que rodean el cable. La sombra oscura a la izquierda es la sombra del cable. (b) El diagrama muestra la dirección del campo magnético para una corriente que se aleja de usted (se dirige hacia dentro de la página).

espolvorear limadura de hierro sobre un pedazo de vidrio colocado sobre una barra magnética. La limadura de hierro se alinea en la dirección del campo magnético.

**Pregunta** ¿Cómo cambiaría la fotografía de la figura 12-3 si se invirtieran los polos del imán?

**Respuesta** La fotografía no cambiaría porque la limadura de hierro no indica en qué sentido apunta el campo.

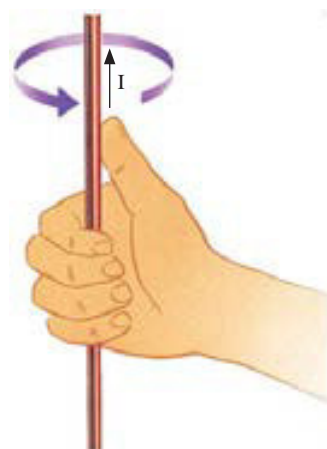
## Corrientes eléctricas y magnetismo

Aunque la electricidad y el magnetismo se conocen desde hace siglos, no se estableció ninguna relación entre los dos fenómenos hasta el siglo XIX. En 1820, Hans Christian Oersted, un científico danés, descubrió una conexión mientras efectuaba una demostración: la aguja de una brújula experimenta una fuerza cuando se acerca a un cable que transporta corriente. Esto significa que el cable que transporta corriente produce un campo magnético en el espacio circundante. El descubrimiento resultó fascinante pero no obstante, confuso. Se sabía que las cargas inmóviles no producían campos magnéticos, de modo que el movimiento de las cargas debe producir el campo. La fotografía de la figura 12-4 (a) exhibe que las líneas del campo magnético forman círculos respecto al cable.

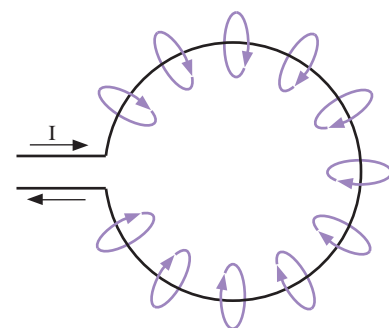
La dirección del campo magnético se obtiene con la regla de la mano derecha: si toma el cable mientras el pulgar de su mano derecha apunta en la dirección de la corriente, sus dedos forman un círculo alrededor del cable en la dirección del campo magnético, como se aprecia en la figura 12-5.

Al doblar el cable se producen diferentes esquemas del campo. Por ejemplo, en la figura 12-6 se presenta el campo magnético de un circuito circular del cable. Las contribuciones al campo magnético desde cada segmento del cable se suman dentro del circuito para producir un campo que apunta hacia dentro de la página. La incorporación de más circuitos para formar la estructura cilíndrica llamada *solenoides* (figura 12-7), produce un campo magnético similar al imán de barra de la figura 12-3. El campo magnético dentro del solenoide es relativamente intenso y bastante uniforme, excepto cerca de los extremos.

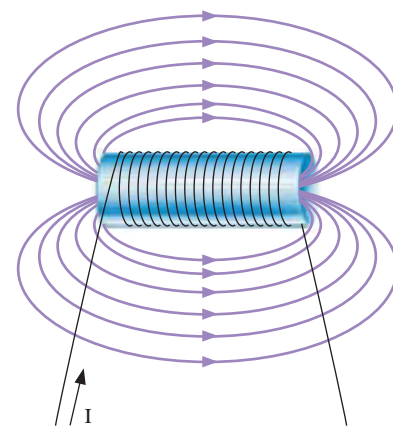
Observaciones como éstas llevaron al físico francés André Ampère a sugerir que *todos* los campos magnéticos se originan en circuitos con corriente. Ahora cree-



**Figura 12-5** La dirección del campo magnético se determina mediante la regla de la mano derecha. Si su pulgar apunta en la dirección de la corriente, sus dedos forman un círculo alrededor del cable en la dirección del campo.



**Figura 12-6** El campo magnético de este circuito único de cable apunta hacia dentro de la página dentro del circuito y hacia fuera de la página fuera del circuito.



**Figura 12-7** El campo magnético de un solenoide es similar al de un imán de barra.

mos que el magnetismo se origina en los circuitos con corriente a nivel atómico. En un modelo simplificado del átomo, visualizamos que estas corrientes surgen de los electrones que orbitan los núcleos atómicos o que giran sobre sus ejes. La superposición de estos campos magnéticos atómicos determina las propiedades magnéticas macroscópicas de un objeto. Si sus orientaciones son aleatorias, los objetos no tienen una magnetización neta; si están alineados, los objetos están magnetizados.

## Preparación de imanes

Igual que una carga eléctrica, nuestro universo está lleno de magnetismo. Normalmente no percibimos el magnetismo debido a la orientación aleatoria de los circuitos con corriente atómicos. Sin embargo, los átomos se alinean ante la presencia de un campo magnético. En casi todos los materiales, este alineamiento desaparece cuando se elimina el campo magnético. Sin embargo, en algunos materiales los átomos permanecen alineados y, por lo tanto, conservan su magnetismo macroscópico.

Un pedazo de hierro se magnetiza al colocarlo en un campo magnético fuerte, al frotarlo con un imán, o al golpearlo mientras está en un campo magnético. Si se golpea una barra de hierro apoyada en el suelo verticalmente se magnetizará porque el campo magnético de la Tierra tiene un componente vertical. Puede comprobar la magnetización resultante al sostener una brújula cerca de la parte superior y la parte inferior de un objeto metálico, como un archivero. El abrir y cerrar de los cajones del archivero funciona como un golpe; el campo magnético de la Tierra hace el resto. La figura 12-8 presenta la orientación de una brújula cerca de la parte superior y la parte inferior de un archivero. Por otra parte, un objeto de hierro que ha sido magnetizado puede perder su magnetismo si se deja caer, porque el impacto tiende a volver aleatorio el alineamiento de los átomos. El calentamiento del objeto también vuelve aleatorios los campos magnéticos atómicos.

### FÍSICA | HÁGALO USTED MISMO

Magnetice una barra de hierro al alinearla con el campo magnético de la Tierra y golpear uno de sus extremos con un martillo. En Estados Unidos, el campo magnético de la Tierra apunta hacia el norte y hacia abajo. Debido a que el campo de la Tierra tiene un componente vertical, la barra también se magnetiza al rebotar su extremo sobre una superficie dura.

**Figura 12-8** Los campos magnéticos cerca de la parte superior e inferior de un archivero metálico apuntan en direcciones opuestas.







© Dembinsky Photo Associates

Un electroimán grande sirve para trasladar los contenedores sobre una embarcación.



**Figura 12-9** Se puede construir un electroimán muy sencillo con un clavo y un poco de cable.

Se construye un imán versátil al envolver un cable sobre un centro de hierro y conectar los extremos del cable a una batería, como se aprecia en la figura 12-9. Cuando pasa una corriente por la bobina del cable, genera un campo magnético sobre el eje de la bobina. El campo magnético que se induce en el hierro se suma al del solenoide, lo cual aumenta la fuerza del campo magnético. Estos **electroimanes** son muy útiles porque se pueden activar y desactivar, la fuerza del campo se modifica al variar la corriente, y pueden producir campos magnéticos muy grandes. Los electroimanes sirven para tareas como mover automóviles o separar desperdicios de hierro de metales no magnéticos.

## El ampere

Un cable que transporta corriente ejerce fuerzas sobre las agujas de una brújula (figura 12-10). Por lo tanto, según la tercera ley de Newton, un imán debe ejercer una fuerza sobre el cable. Este efecto pronto se verificó mediante un experimento. Un cable entre las mordazas de un imán de herradura grande salta de la abertura cuando se activa la corriente (figura 12-11). Esta fuerza es más grande cuando el cable está perpendicular al campo magnético. La fuerza en el cable siempre es perpendicular a éste y hacia el campo magnético.

Estas experiencias indican que dos cables que llevan corriente deben ejercer fuerzas entre sí. En efecto. El campo magnético producido por cada corriente ejerce una fuerza sobre el otro. Si las corrientes están en la misma dirección, se atraen entre sí (figura 12-12); si las corrientes están en direcciones opuestas, se repelen.

Este efecto sirve para definir la unidad de la corriente; la unidad eléctrica básica en el sistema métrico. Considere dos cables paralelos largos separados por 1 metro y que llevan la misma corriente. Si la fuerza entre estos cables es  $2 \times 10^{-7}$  newtons en cada metro del cable, la corriente se define como 1 **ampere** (A). En ese caso, el **coulomb** (C) se define como la cantidad de carga que pasa por un punto específico en uno de estos cables durante 1 segundo. Ésta es igual que la carga sobre  $6.24 \times 10^{18}$  protones.

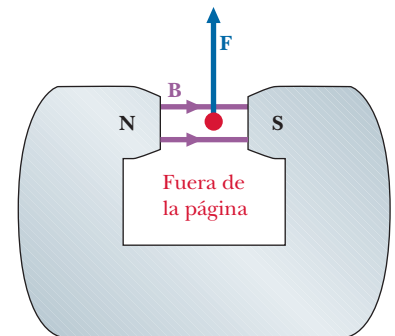
La fuente de la fuerza en cada cable es el campo magnético producido por el otro cable. También podemos utilizar los cables que interactúan para definir una intensidad del campo para el magnetismo. La intensidad del campo magnético a una distancia de 1 metro de un cable recto largo que lleva una corriente de 1 ampere es  $2 \times 10^{-7}$  **teslas** (T). Otra unidad para la fuerza del campo magnético, el **gauss** (G), se suele aplicar en lugar de los teslas, en donde 1 tesla = 10 000 gauss.

Los imanes que se utilizan para sostener apuntes o fotografías sobre un refrigerador producen campos en el orden de 0.3 tesla, mientras que los imanes de laboratorio grandes producen campos de 2.5 teslas. El límite teórico para un campo magnético permanente son 5 teslas. Los electroimanes hechos con cables comunes han producido campos uniformes de 34 teslas, mientras que los fabricados con cables superconductores todavía no han excedido los 22 teslas. Las combinaciones



© David Rogers

**Figura 12-10** Un cable que transporta corriente produce un campo magnético que rodea el cable. Observe que las brújulas encima y abajo del cable apuntan en direcciones opuestas.



**Figura 12-11** El campo magnético del imán de herradura ejerce una fuerza sobre el cable que lleva corriente, y hace que salte de las mordazas del imán.

## Superconductividad

Bajo condiciones normales, todos los conductores exhiben una resistencia al paso de una corriente eléctrica. Esto cobra sentido si usted visualiza los electrones de la conducción avanzando a choques por un metal formado por una formación de átomos que vibran. La diferencia del potencial eléctrico proporcionada por una batería acelera los electrones sobre el cable, y después pierden en los choques sus velocidades adquiridas. La sorpresa es que la resistencia eléctrica de algunos materiales disminuye a cero a temperaturas muy bajas; se vuelven *superconductores*.

Este conocimiento no es un descubrimiento nuevo: la superconductividad fue descubierta por el físico holandés Heike Kamerlingh Onnes en 1911. Tres años antes, Onnes había desarrollado un proceso para licuar el helio y, por lo tanto, pudo estudiar las propiedades de los materiales a temperaturas muy bajas. El primer superconductor fue mercurio sólido, el cual perdió su resistencia eléctrica a una temperatura crítica de 4.15 K. Los experimentadores buscaron metales o aleaciones que exhibieran superconductividad, y se encontraron superconductores nuevos con temperaturas críticas tan altas como 23 K.

En 1972, tres físicos estadounidenses, John Bardeen, Leon Cooper y J. Robert Schrieffer, recibieron el premio Nobel por explicar la superconductividad en 1957. Su teoría, llamada la teoría BCS, mostraba cómo los electrones se apareaban para viajar sin esfuerzo por el material. La resistencia eléctrica no sólo disminuye a un valor muy bajo; ¡se reduce a cero! Una vez que se ha establecido una corriente en un material superconductor, persistirá sin que se aplique ningún voltaje. Se ha observado que tales supercorrientes duran varios años, lo cual tiene estupendas aplicaciones prácticas en la generación de campos magnéticos. Los campos magnéticos grandes requieren corrientes muy grandes. En los materiales ordinarios, esto significa generar mucha energía térmica a un costo alto y desviar el calor para evitar que se fundan los imanes. En contraste, una vez que se han establecido corrientes grandes en imanes superconductores, se puede desconectar de la corriente; ya no se requiere energía eléctrica.

Los modelos teóricos para la superconductividad predijeron un límite superior para la temperatura crítica de alrededor de 30 K. Si este límite superior hubiera sido cierto, la superconductividad se hubiera mantenido en el dominio de las temperaturas muy bajas. Los únicos gases con puntos de ebullición así de bajos son el helio (que es costoso) y el hidrógeno (que es explosivo). En 1986, casi 80 años después del descubrimiento del primer superconductor, se descubrió una nueva clase principal de superconductores, con temperaturas críticas mucho más altas. Estos nuevos superconductores son las *cerámicas* hechas de óxidos de cobre mezcladas con elementos terrestres raros como lantano e itrio, que tienen temperaturas críticas hasta de 125 K. Este límite nuevo es muy importante, porque esta temperatura es más alta que el punto de ebullición del nitrógeno, un gas abundante y cuyo costo de licuefacción es relativamente bajo y es seguro de usar, lo cual permite utilizarlo para mantener un material como superconductor. Ocurrirá un incremento tremendo en el uso de los superconductores si se puede fabricar un material superconductor con una temperatura crítica superior a

la temperatura ambiente (o cuando menos por encima de las obtenidas mediante la refrigeración normal).

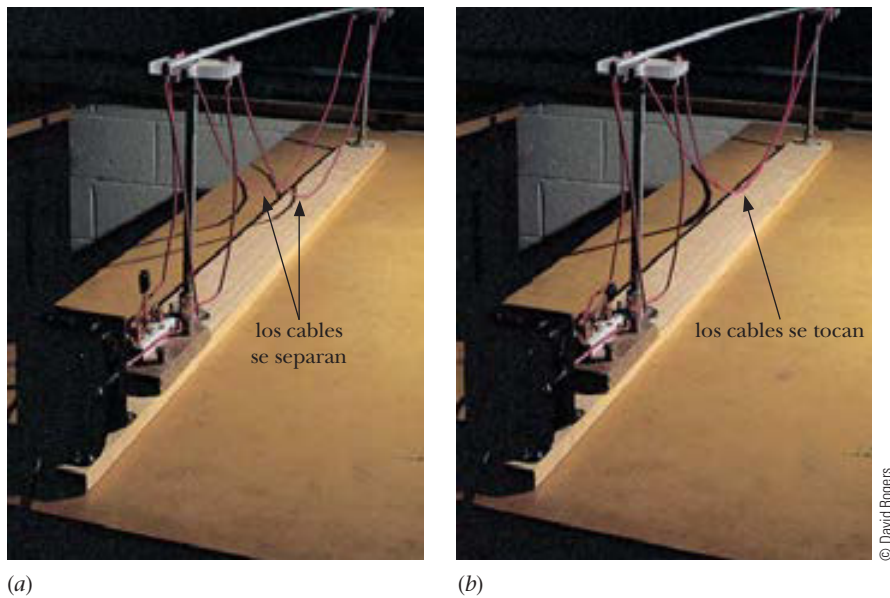
Una aplicación potencial muy importante de la superconductividad es el transporte de energía eléctrica. Con las líneas de transmisión convencionales, se pierde gran parte de la electricidad producida en plantas distantes por los efectos de resistencia al calor en los cables que acarrean esta energía hasta nuestros hogares. Una línea de superconducción eliminaría estas pérdidas. Por supuesto el problema es que necesitamos enfriar estos conductos para hacerlos superconductores. Sin embargo, si podemos utilizar una refrigeración normal, los costos de enfriamiento serán mucho menores que los costos de las pérdidas por resistencia.

Los superconductores pueden tener una segunda propiedad muy importante. Expelen los campos magnéticos cuando se vuelven superconductores. Esto también significa que los campos magnéticos no pueden penetrar los superconductores y por lo tanto, repelerán los imanes. Esto se presenta de manera impactante al hacer flotar un imán permanente sobre un superconductor, igual que en la figura. Este efecto puede hallar aplicaciones en el mejoramiento de la levitación magnética de los trenes de transporte a alta velocidad. En Japón se construyó un prototipo con imanes superconductores enfriados con helio para levantar el tren, al igual que para impulsarlo a velocidades hasta de 300 mph.



Un imán permanente levita sobre un superconductor porque su campo magnético no puede penetrar el material superconductor.

Se han propuesto muchas otras aplicaciones. Las propiedades de conmutación de los materiales superconductores pueden tener un gran impacto en el campo de la electrónica de las computadoras. También se podrían construir generadores y motores superconductores. Estos nuevos materiales superconductores también hallarían aplicaciones en el campo de las imágenes médicas. Sin embargo, muchas de estas aplicaciones exigirán avances tecnológicos importantes en la fabricación (por ejemplo, las cerámicas son quebradizas y por lo tanto, difíciles de formar como cables) y el descubrimiento de materiales que transporten corrientes más grandes.



**Figura 12-12** (a) Cuando se abre el interruptor, no hay una fuerza de atracción entre los cables. (b) Cuando se cierra el interruptor, las corrientes están en la misma dirección, y los cables se atraen entre sí.

de estos dos tipos de imanes han llegado a 45 teslas. En el extremo superior, los imanes con pulsaciones han producido campos de 70 teslas. Se han generado incluso campos más altos que se acercan a 1000 teslas por tiempos muy cortos, pero las fuerzas son tan grandes que los imanes se destruyen a sí mismos.

## La Tierra magnética

Como se mencionó antes, una brújula sencilla muestra que la Tierra actúa como si tuviera un enorme imán en su centro, como se observa en la figura 12-13. La intensidad del campo magnético de la Tierra en la superficie suele ser de  $5 \times 10^{-5}$  teslas (0.5 gauss). En Estados Unidos, su componente horizontal suele apuntar hacia el norte y un componente todavía más grande apunta hacia abajo.

Las mediciones del campo magnético muestran que uno de los polos magnéticos de la Tierra está en el noreste de Canadá, justo al norte de la bahía de Hudson, a unos 1300 kilómetros del Polo Norte geográfico. El otro polo magnético de la Tierra está casi directamente en el otro lado del planeta. Una línea que atraviesa la Tierra y que conecta estos dos polos se inclina unos 12 grados a partir del eje de rotación de la Tierra, el cual pasa por los Polos geográficos Norte y Sur de la Tierra.

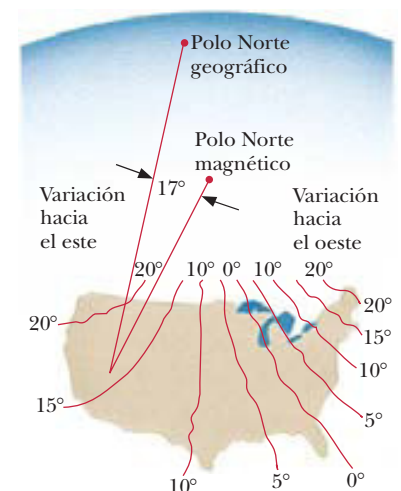
**Pregunta** ¿El polo magnético ubicado al norte de Canadá es un polo norte o un polo sur magnético?

**Respuesta** Debido a que este polo atrae el polo norte de una brújula y a que los polos opuestos se atraen, este polo magnético en realidad debe ser un polo sur magnético. Sin embargo, la ubicación geográfica del polo todavía se conoce como Polo Norte magnético.

La inclinación del eje magnético de la Tierra desde su eje de rotación complica la localización de un norte verdadero con una brújula. El único momento en que su brújula apuntará al norte verdadero es cuando el polo magnético está entre usted y el polo geográfico. Debido a las variaciones locales en el campo magnético, esta situación ocurre sobre una línea irregular que va desde Florida a los Grandes Lagos, como se indica en la figura 12-14. Si usted está al este de esta línea, su brújula apuntará al oeste del norte verdadero. Si usted está al oeste de esta línea, su brújula apunta al este del norte verdadero. La diferencia en las direcciones de los polos magnético y geográfico se conoce como la *variación magnética*. Como ejemplo, la variación magnética en Bozeman, Montana, en la actualidad es de 15.5 grados este.



**Figura 12-13** La Tierra es un imán gigante con su polo sur magnético en el hemisferio norte. Esta visión inicial del magnetismo de la Tierra ha sido reemplazada por una en la cual el campo magnético se genera mediante las corrientes eléctricas en el centro de la Tierra.



**Figura 12-14** La variación magnética entre las direcciones de los Polos Norte geográfico y magnético cambia a través de Estados Unidos.



Los pilotos de aviones emplean rumbos magnéticos y consultan sus mapas aeronáuticos para determinar los rumbos verdaderos. Los números grandes pintados en los extremos de las pistas corresponden a las direcciones magnéticas de las pistas, divididas entre 10 y redondeadas.

En una época, los científicos imaginaban que el campo magnético de la Tierra era provocado por hierro sólido magnetizado en el interior de ésta, pero ahora creen que esto no es cierto. Se sabe que el interior de la Tierra es lo suficientemente caliente para que el hierro y el níquel estén en estado líquido. En un estado líquido, los campos magnéticos atómicos no permanecen alineados, sino adquieren orientaciones aleatorias, lo cual elimina el efecto magnético macroscópico.

El mejor modelo es uno en donde las grandes corrientes eléctricas que circulan en el interior fundido provocan el campo magnético de la Tierra. Tales corrientes podrían fácilmente producir el campo que observamos en la Tierra, al igual que las características generales de los campos magnéticos de los otros planetas. Sin embargo, esta teoría presenta algunas dificultades. Nadie comprende los detalles de los mecanismos para producir y conservar las corrientes.

El aspecto más desconcertante del campo magnético de la Tierra son sus inversiones, cuando los Polos Norte y Sur cambian de posiciones. Existe una fuerte evidencia de que el campo magnético de la Tierra ha cambiado de dirección 171 veces en los últimos 17 millones de años. Esta evidencia proviene de las rocas en ambos lados de una grieta en medio del Atlántico. Conforme la roca emerge de la grieta, se enfría y solidifica, y en ese momento la dirección de la magnetización de la Tierra se fija en las rocas y se conserva. Las muestras del suelo oceánico indican que la dirección de los campos magnéticos en la roca se alternan conforme nos acercamos a la grieta. Aunque sabemos que han ocurrido estas inversiones, nadie ha propuesto un mecanismo satisfactorio para ellas o para explicar el origen de la inmensa cantidad de energía requerida para invertir el campo.

✓ El suplemento *Problem Solving* (Solución de problemas) ofrece una presentación extendida.


## Partículas cargadas en los campos magnéticos

✓ **MATEMÁTICAS**

Recuerde que un imán no afecta un objeto cargado, aparte de la atracción electrostática normal entre los objetos neutros y cargados. Por otra parte, un cable que transporta corriente en un campo magnético experimenta una fuerza. Debido a que una corriente eléctrica es una serie de partículas cargadas, el movimiento de las cargas debe ser importante. Por extraño que parezca, la fuerza magnética en una partícula cargada es cero, a menos que la carga se mueva.

Además, es probable que la dirección de la fuerza magnética no sea lo que usted predeciría. Recuerde que la corriente (el movimiento de las partículas cargadas) es sobre el cable de la figura 12-11, pero que el cable experimenta una fuerza en una dirección perpendicular al mismo y perpendicular al campo magnético. Por lo tanto, esperamos que una partícula cargada que se mueve en un campo magnético experimente una fuerza que está en ángulos rectos a su velocidad y al campo magnético.

La intensidad de la fuerza depende de la carga  $q$ , la intensidad del campo magnético  $B$ , la velocidad  $v$ , y el ángulo entre el campo y la velocidad. La fuerza magnética está al máximo cuando el campo y la velocidad están perpendiculares:

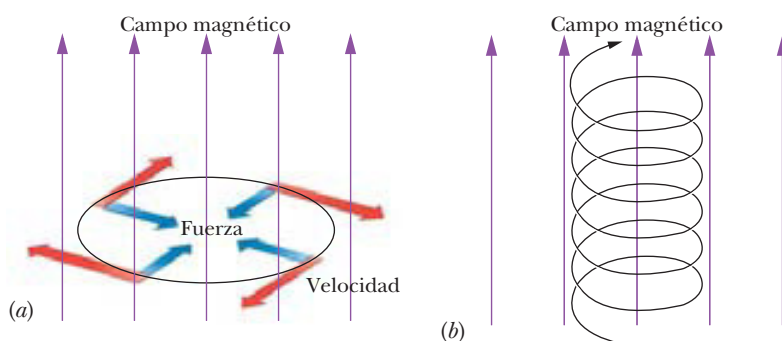
fuerza magnética máxima = carga  $\times$    
velocidad  $\times$  campo magnético

$$F_{\max} = qvB$$

Cuando la velocidad y el campo magnético están paralelos, la fuerza es cero.

La fuerza magnética produce algunos fenómenos interesantes. En primer lugar, debido a que la fuerza siempre está perpendicular a la velocidad de la partícula, nunca cambia la velocidad de la partícula, sólo su dirección. Si la velocidad de la partícula está paralela al campo magnético, la partícula no experimenta ninguna fuerza, y se mueve en una línea recta. Por otra parte, si la velocidad está perpendicular al campo, la partícula experimenta una fuerza centrípeta que hace que se mueva en una trayectoria circular (figura 12-15[a]). Si la velocidad tiene componentes paralelo y perpendicular al campo magnético, estos dos movimientos se





**Figura 12-15** (a) Las partículas cargadas siguen una trayectoria circular si su velocidad está perpendicular al campo magnético. (b) La trayectoria es helicoidal si su velocidad tiene componentes perpendicular y paralelo al campo.

superpondrán y la partícula seguirá una trayectoria helicoidal (figura 12-15[b]) a lo largo del campo magnético.

La fuerza magnética sobre las partículas cargadas es la causa de los dramáticos efectos conocidos como *aurora boreal* y *aurora austral*. Cuando las partículas cargadas, principalmente del Sol, pero también del espacio exterior, se acercan a la Tierra, interactúan con el campo magnético terrestre. Esta interacción hace que las partículas cargadas sigan trayectorias helicoidales a lo largo del campo magnético terrestre, de modo que chocan contra la atmósfera en las regiones de los polos magnéticos. Las colisiones de estos rayos cósmicos con las moléculas de oxígeno y nitrógeno en la atmósfera producen las espectaculares luces nocturnas que se observan en lo alto de los Polos Norte y Sur magnéticos.

Las fuerzas magnéticas en las partículas cargadas son importantes en muchos dispositivos científicos y tecnológicos, desde recipientes de contención utilizados para desarrollar la tecnología futura de los reactores de fusión hasta aceleradores de partículas utilizados en la investigación y en los televisores.

## Magnetismo y corrientes eléctricas

En la evolución de la visión del mundo de la física, ha surgido una pequeña cantidad de temas básicos que reflejan nuestras tendencias, pero también alimentan nuestras búsquedas. Uno de tales temas es la simetría. Varias veces, se han hecho avances mientras se buscan los efectos simétricos. Al principio en el desarrollo de nuestra comprensión de la electricidad y el magnetismo, las preguntas sobre la simetría obsesionaban a algunos experimentadores. En particular, preguntaban, “Dado que una corriente eléctrica produce un campo magnético, ¿un campo magnético produce una corriente eléctrica?”. Para investigar esto, puede hacer la prueba de envolver cable alrededor de un imán y conectar el cable a un *amperímetro*, un instrumento para medir la corriente. Aunque se efectuaron experimentos similares con imanes grandes e instrumentos sensibles, no se encontró dicho efecto.

El científico británico Michael Faraday descubrió la conexión en 1831. Encontró que el movimiento es la clave para producir una corriente eléctrica con un imán. Si se mueve un cable a través de un campo magnético (pero no paralelo al campo), se produce una corriente en el cable. Esta corriente se debe al movimiento del cable en el campo magnético; no hay baterías. La corriente es más grande si el movimiento es perpendicular al campo, y aumenta con la velocidad del cable. Con el beneficio de la retrospectiva, vemos que esto es comprensible a causa de la fuerza magnética sobre las cargas en el cable.

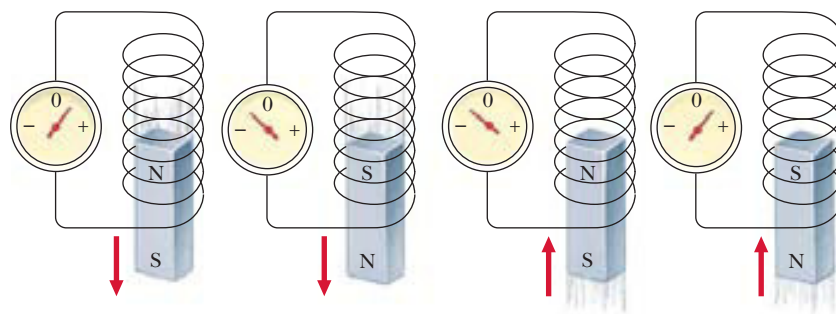
Debido a que el principio de la relatividad debe ser válido para la electricidad y el magnetismo, sabemos que lo importante es el movimiento *relativo* del cable y el imán. No importa cuál se mueve respecto al laboratorio y cuál está inmóvil. Por lo tanto, debemos ser capaces de generar una corriente en un cable inmóvil al mover el imán. Este principio se demuestra con un experimento sencillo. Si se coloca un imán en barra en una bobina de alambre y se retira rápido, se genera una corriente que se detecta con facilidad. La inserción rápida del imán dentro de la bobina genera una corriente en la dirección opuesta. La inversión de la dirección del imán



© Kevin Schafer/Photographer's Choice/Getty Images

La aurora boreal es provocada por los rayos cósmicos que siguen las líneas del campo magnético hacia el Polo Norte magnético.

**Figura 12-16** Un imán insertado o retirado de una bobina de un cable produce una corriente. (Cuando la aguja está centrada, no hay corriente.)



en barra también invierte la dirección de la corriente. La figura 12-16 exhibe las cuatro posibilidades.

Faraday también descubrió que el movimiento no es la única manera de producir una corriente con un campo magnético. Se produce una corriente si la intensidad del campo magnético varía con el tiempo, incluso cuando no hay un movimiento relativo del cable y el imán. Un campo creciente produce una corriente en una dirección; un campo decreciente produce una corriente en la dirección opuesta.

Después de una extensa serie de experimentos efectuados durante varios años, Faraday fue capaz de generalizar sus resultados en términos de las líneas de un campo magnético. Se observa que estas líneas apuntan sobre la dirección del campo magnético en todos los puntos en el espacio. El número de líneas en una región específica del espacio representa la intensidad del campo magnético. Las líneas están más cercanas donde el campo magnético es más fuerte.

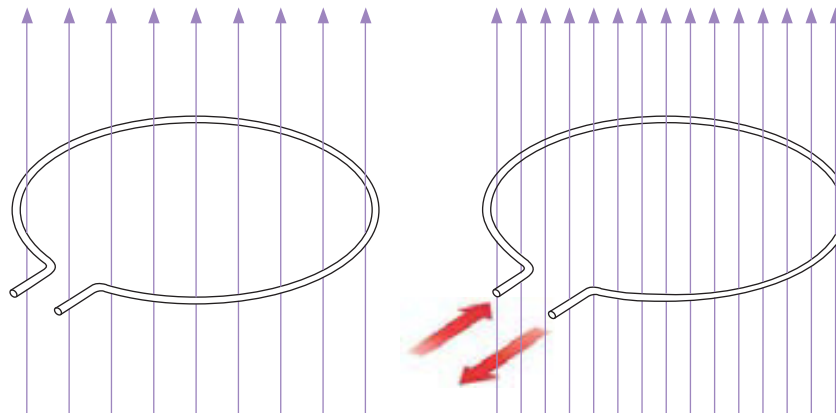
ley de Faraday ➤

Faraday demostró que si el número de líneas de un campo magnético que pasan por un circuito de cable cambiaba *por cualquier razón*, se producía una corriente en el circuito (figura 12-17). El voltaje (y, por lo tanto, la corriente) generado en el circuito depende de cuán rápido cambia el número de líneas del campo que atraviesan el circuito: entre más rápido es el cambio, más grande es el voltaje. Estos fenómenos se conocen ahora como la ley de Faraday.

ley de Lenz ➤

La dirección de la corriente inducida en la bobina por el número cambiante de líneas en el campo magnético se obtiene mediante la ley de Lenz, la cual afirma que la corriente siempre produce un campo magnético para oponerse al cambio. Por ejemplo, en la figura 12-17 aumenta el número de líneas en dirección hacia arriba. Por lo tanto, la corriente inducida producirá un campo magnético que apunta hacia abajo para tratar de cancelar el incremento. Observe que la corriente presentada en la figura 12-17 hace esto. Si el número de líneas hubiera disminuido, la corriente se induciría en la dirección opuesta, para producir un campo magnético en dirección hacia arriba para tratar de conservar el campo original.

**Figura 12-17** Cambiando el número de líneas del campo magnético que atraviesa un circuito de cable produce una corriente. La dirección de la corriente se obtiene mediante la ley de Lenz.



**Pregunta** ¿Qué vería en el amperímetro si dejara caer un imán a través de la bobina de la figura 12-16?

**Respuesta** Cuando el imán entra a la bobina, la aguja girará hacia un lado debido al incremento en el número de líneas del campo que atraviesan la bobina. Cuando sale el imán, la aguja voltará al otro lado, porque disminuye el número de líneas.

## Razonamiento defectuoso



La pregunta siguiente aparece en el examen de mitad del curso: “Un circuito de cobre se coloca plano sobre una mesa. Si el polo norte de un imán de barra se acerca rápido al circuito, como se aprecia en la figura 12-18, se induce una dirección en el circuito en la dirección expresada por la ley de Lenz. Encuentre esta dirección y explique cómo utilizó la ley de Lenz.”

José proporciona la respuesta siguiente: “Las líneas del campo magnético salen del polo norte de un imán de barra, de modo que las líneas del campo que atraviesan el circuito se dirigen hacia abajo. La ley de Lenz declara que se generará un campo magnético inducido en la dirección opuesta; es decir, hacia arriba. Mediante la regla de la mano derecha, la corriente inducida debe ser levógira para producir este campo.”

La corriente inducida es levógira, como afirma José, pero no por la razón expresada. **Explique la ley de Lenz a José.**

**Respuesta** Hay dos campos magnéticos en el circuito: el campo *externo* del imán de barra y el campo *inducido* debido a la corriente. José cree que el campo inducido se opone al campo externo, pero esto no es lo que afirma la ley de Lenz. El campo inducido se opone a cualquier carga en el campo externo, no al campo mismo. José señala la dirección correcta por suerte. Si el imán de barra se mueve hacia arriba, el razonamiento de José produce la respuesta incorrecta. El campo externo en el circuito es hacia abajo y se hace más débil. José predice que el campo inducido es hacia arriba para oponerse al campo externo hacia abajo. Lenz nos dice que el campo inducido es hacia abajo para oponerse al debilitamiento del campo externo.

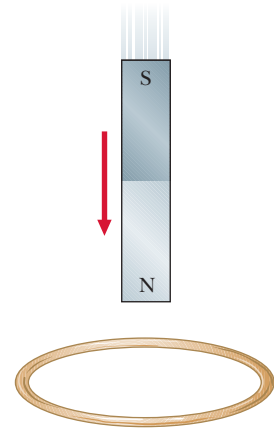


Figura 12-18



Los transformadores de una zona de viviendas reducen el voltaje para uso en los hogares.

## Transformadores



Estos descubrimientos sobre el magnetismo —en especial sus conexiones con la electricidad— tienen muchos usos prácticos. Por ejemplo, son fundamentales para la operación de los transformadores utilizados para modificar el voltaje de la electricidad de corriente alterna. Se puede suministrar la misma cantidad de energía eléctrica a través de cables a un voltaje bajo y una corriente alta que a un voltaje alto y a una corriente baja (capítulo 11). Por ejemplo, 10 amperes a 12 volts proporcionan la misma potencia que 1 ampere a 120 volts. La elección específica de cuál amperaje y cuál voltaje se utilizan depende de las circunstancias. Los recipientes cilíndricos grandes de un poste de luz son transformadores para reducir el voltaje a 120 volts antes que entre a nuestras casas y negocios.

El diagrama esquemático de la figura 12-19 exhibe las funciones esenciales de un transformador. Una bobina, llamada la *bobina principal*, se conecta a una fuente de corriente alterna. La corriente alterna en la bobina principal produce un campo magnético alterno que el núcleo de hierro transmite a la *bobina secundaria*. Este campo magnético alterno produce un voltaje alterno en la bobina secundaria.

La magnitud del voltaje producido en la bobina secundaria depende de la razón del número de circuitos en las dos bobinas. Un transformador diseñado para reducir voltaje por un factor de 2 tendría la mitad de circuitos en la bobina secundaria que en la bobina primaria.

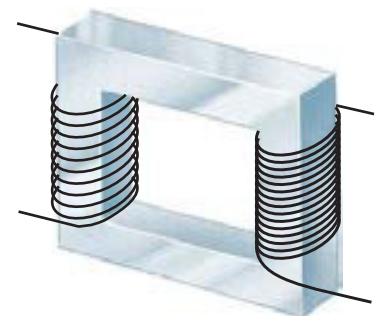
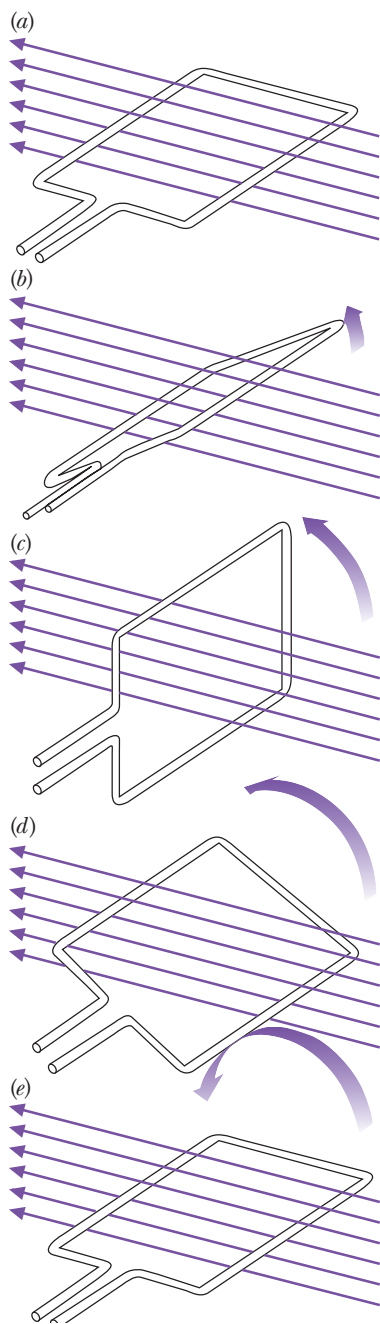


Figura 12-19 Las características esenciales de un transformador.



**Figura 12-20** El número de líneas de un campo magnético que atraviesan un circuito de un cable cambia conforme gira el circuito. Esto produce el voltaje alterno exhibido en la figura 12-21.

**Pregunta** ¿Por qué un transformador no funciona con corriente directa?

**Respuesta** La corriente directa no produce el campo magnético variable necesario para inducir una corriente en la bobina secundaria.

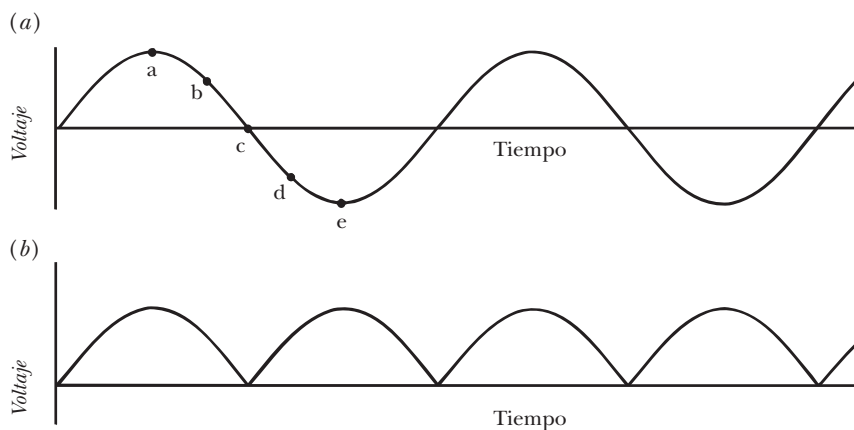
## Generadores y motores

El generador eléctrico es otra aplicación del descubrimiento de Faraday. Si giramos 90 grados el circuito del cable de la figura 12-17, el número de líneas del campo magnético que atraviesan el circuito disminuye a cero. El cambio en el número de líneas que atraviesan el circuito produce un voltaje alrededor del circuito, el cual genera una corriente. El circuito se hace girar mediante una turbina de vapor o el agua que cae en una instalación hidroeléctrica. El vapor se produce de muchas maneras: al quemar madera, carbón, petróleo, o gas natural, o al utilizar el calor del Sol o reactores nucleares.

La figura 12-20 contiene una serie de dibujos del campo magnético y un circuito de cable en un generador eléctrico que ejemplifica cómo la rotación del circuito produce voltajes (y corrientes) eléctricos. La figura 12-20 (a) presenta el plano del circuito paralelo a las líneas del campo magnético. El número de líneas que atraviesan el circuito en esta orientación es cero. Cuando el circuito gira a una velocidad constante, al principio el número de líneas disminuye rápido, lo cual produce un voltaje grande. Conforme sigue girando (b), el número de líneas que atraviesan el circuito sigue aumentando, pero a una velocidad más lenta. El voltaje disminuye a cero cuando el plano del circuito está perpendicular a las líneas del campo (c) y el número de líneas que atraviesa el circuito está al máximo. Ahora (d) disminuye el número de líneas que atraviesan el circuito y el voltaje aumenta en la dirección opuesta. Se incrementa a un valor máximo (e) y después regresa a cero cuando el plano del circuito otra vez está perpendicular a las líneas del campo. El voltaje aumenta a un máximo en la dirección opuesta, y se repite el ciclo completo. Este generador produce el voltaje alterno exhibido en la figura 12-21 (a).

Un cambio sencillo en el modo en que se transporta el voltaje al circuito externo convierte el generador para producir una corriente directa con pulsaciones (figura 12-21[b]). Un conector (llamado un *conmutador*), presentado en la figura 12-22, invierte las conexiones del circuito hacia el circuito exterior cada media vuelta. Esta corriente con pulsaciones después se regulariza electrónicamente para producir una corriente directa constante igual a la de una batería.

Un motor de corriente directa es básicamente un generador de corriente directa que funciona en reversa. De hecho, el descubrimiento del primero de esos



**Figura 12-21** (a) Un circuito que gira en un campo magnético produce un voltaje alterno. Las letras muestran el voltaje producido cuando el circuito tiene las posiciones presentadas en la figura 12-20. (b) La corriente directa con pulsaciones producida al utilizar un conmutador.



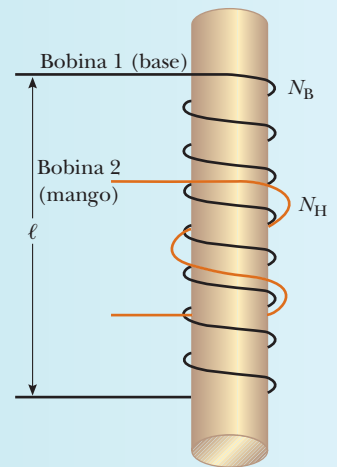
## Cargador de baterías “inalámbrico”

Un cepillo de dientes eléctrico tiene una base diseñada para sostener el mango del cepillo cuando no está en uso. Como se observa en la figura, el mango tiene un orificio con forma cilíndrica de plástico que se ajusta con holgura sobre un cilindro de plástico en la base. ¿Cómo se carga el cepillo de dientes cuando no hay contactos metálicos? Cuando el mango se pone en la base, una corriente cambiante en un solenoide dentro del cilindro de la base (la bobina principal) induce una corriente en una bobina dentro del mango (la bobina secundaria). Esta corriente inducida carga la batería dentro del mango. La magnitud de la corriente inducida se amplifica al

insertar un núcleo de material ferromagnético, como el hierro, dentro de la bobina principal. Después la bobina principal magnetiza el núcleo de hierro, de modo que sus polos se invierten 120 veces por segundo (para una corriente de 60 ciclos). Esto provoca un cambio más grande en el campo magnético dentro de la bobina secundaria.

La carga inalámbrica se utiliza en otros aparatos “inalámbricos”. Un ejemplo importante es la carga inductiva utilizada por muchos fabricantes de automóviles eléctricos, la cual evita el contacto directo metal con metal entre el automóvil y el cargador.

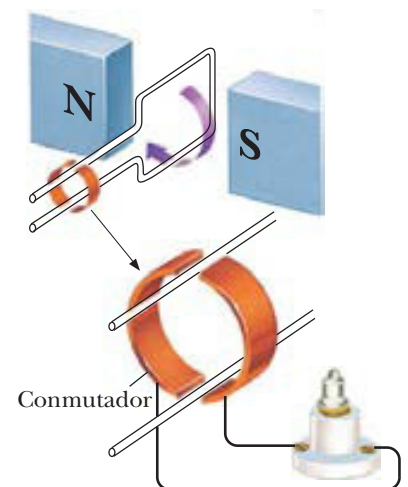
Este cepillo de dientes eléctrico usa una inducción magnética para cargar su batería. La bobina principal (la bobina 1) de  $N_H$  gira en la unidad de la base y la bobina secundaria de  $N_B$  gira en el mango.



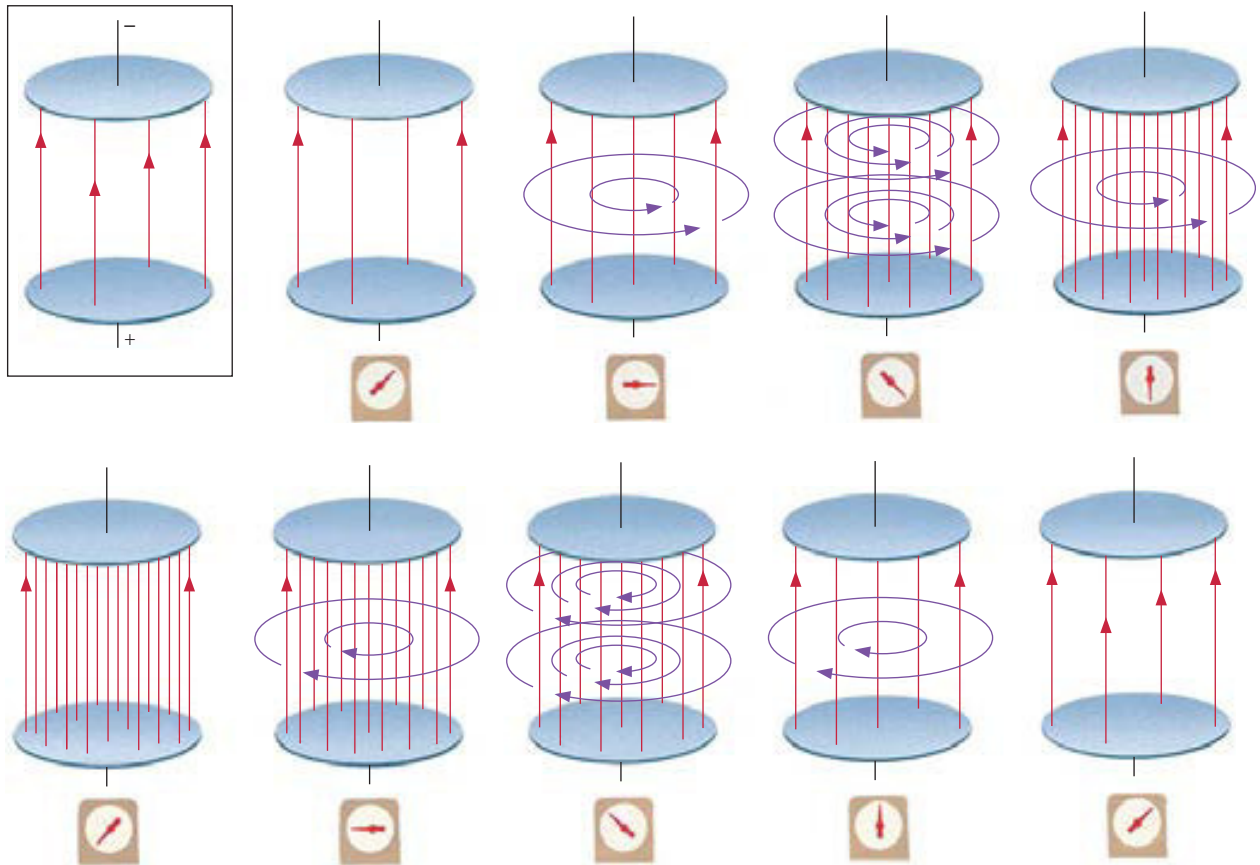
motores ocurrió durante una exhibición en 1873 cuando un técnico que instalaba una demostración de generadores conectó uno de manera incorrecta y ¡“descubrió” un motor! En un generador, giramos el circuito en un campo magnético, lo cual produce un voltaje que mueve las cargas eléctricas. En un motor se invierte la secuencia; aplicamos un voltaje, lo cual hace que las cargas se muevan. Esta corriente en un campo magnético produce una fuerza que hace girar el circuito.

La figura 12-20 sirve para ejemplificar la operación de un motor. Cuando se aplica un voltaje a un circuito cuando está en la posición presentada en la figura 12-20 (a), el campo magnético ejerce una torsión en el circuito que transporta corriente. Las fuerzas en los lados largos del circuito están en direcciones opuestas porque las corrientes también lo están. La torsión disminuye cuando el circuito gira y se vuelve cero cuando el plano del circuito está vertical. Si nada cambia mientras el circuito se desliza por esta posición, oscilará y, en algún momento, se detendrá. Sin embargo, el conmutador invierte la dirección de la corriente, de modo que la torsión continúa funcionando en la misma dirección.

La semejanza de un motor y un generador es importante en algunos vehículos con propulsión eléctrica. Mientras el vehículo acelera o viaja a velocidad constante, el motor funciona como un motor eléctrico. Sin embargo, cuando se aplican los frenos, las conexiones del motor cambian para que funcione como un generador, con el fin de recargar sus baterías. La corriente ejerce una torsión sobre el motor, el



**Figura 12-22** Esquema de un generador de corriente directa.



**Figura 12-23** Un campo eléctrico constante entre las placas paralelas presentadas en el diagrama del cuadro de la izquierda no produce un campo magnético. Un campo eléctrico creciente produce un campo magnético en una dirección, mientras que un campo decreciente produce un campo magnético en la dirección opuesta.

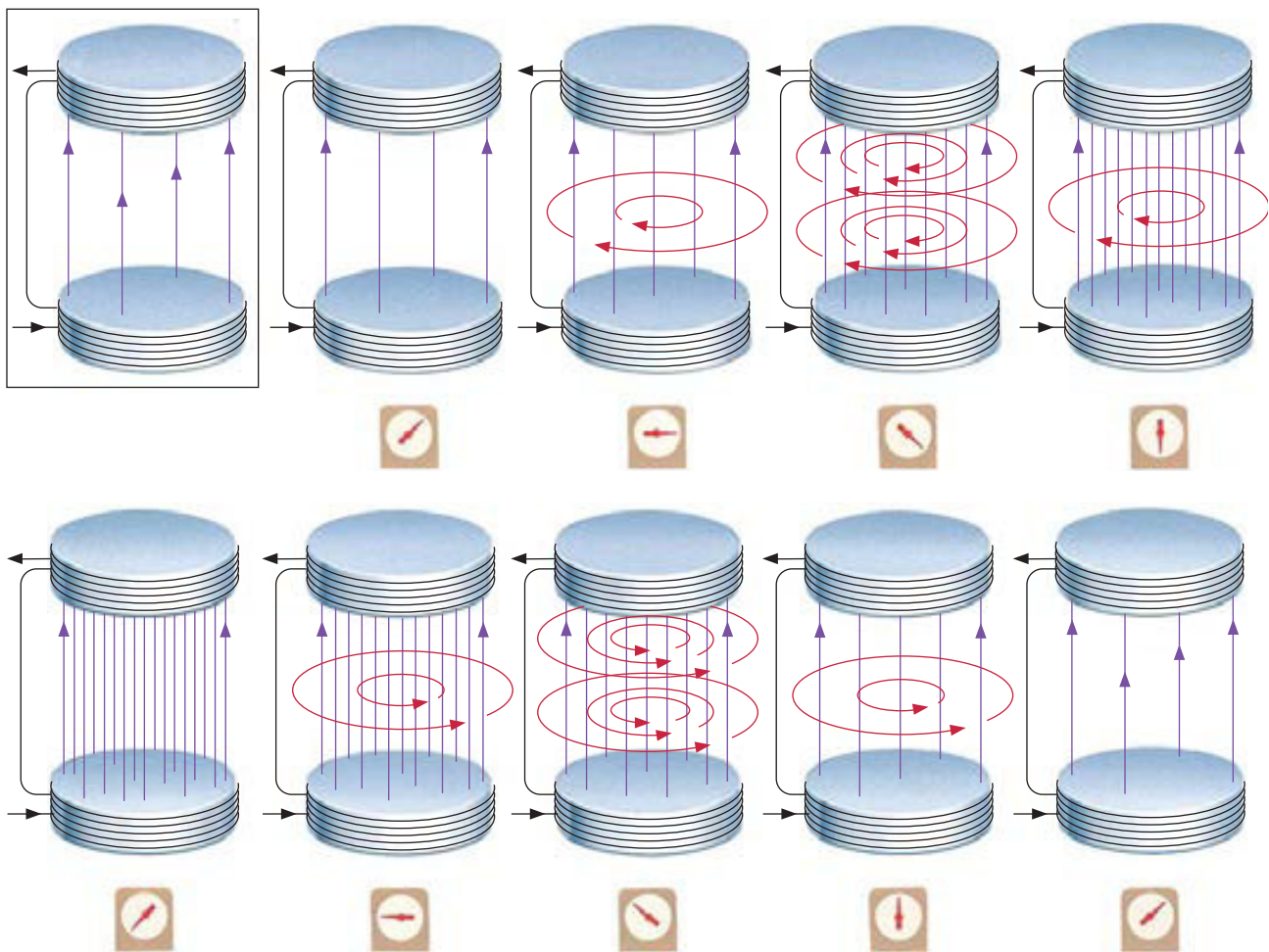
cual a su vez ejerce una torsión sobre las ruedas para detener el vehículo. Ésta no es una máquina de movimiento perpetuo porque sólo se recupera una parte de la energía. No obstante, el frenado regenerativo aumenta la autonomía del vehículo.

## Una cuestión de simetría

La conexión entre la electricidad y el magnetismo parece completa: un campo magnético *cambiante* produce una corriente eléctrica, y una corriente eléctrica produce un campo magnético. Sin embargo, observe que la situación no es realmente simétrica. Se requiere un campo magnético cambiante para producir la corriente eléctrica, pero la corriente eléctrica genera un campo magnético constante.

En realidad, esta conexión sólo se vuelve evidente cuando todo se expresa en términos de los campos eléctrico y magnético. Considere dos placas paralelas conectadas a una batería, igual que en la figura 12-23. Cuando la corriente de la batería acumula cargas en las placas, se genera un campo eléctrico en la región entre las placas. Aunque no fluyen cargas entre las placas, se produce un campo magnético en la región que rodea las placas que coincide con el campo magnético que rodea los cables. Por lo tanto, el origen del campo nuevo no pueden ser las cargas. Además, el campo magnético desaparece cuando se detiene la corriente. El campo eléctrico entre las placas aumenta de manera continua, siempre y cuando la carga fluya hacia las placas y se mantenga constante cuando la carga deja de fluir. Por lo tanto, un campo eléctrico *cambiante* produce el campo magnético. Cuando las cargas salen de las placas, el campo eléctrico disminuye y se produce un campo magnético en la dirección opuesta.

Podemos volver más cercana la analogía al observar la región entre los polos de un electroimán. Cuando aumenta el campo magnético entre los polos, se produce



**Figura 12-24** Un campo magnético constante entre los polos del electroimán presentado en el diagrama del cuadro de la izquierda no produce un campo eléctrico. Un campo magnético creciente produce un campo eléctrico en una dirección, mientras que un campo magnético decreciente produce un campo eléctrico en la dirección opuesta.

un campo eléctrico en la región circundante (figura 12-24). Cuando el campo magnético alcanza su intensidad máxima y ya no cambia, desaparece el campo eléctrico. Cuando disminuye el campo magnético, se produce un campo eléctrico en la dirección opuesta.

Es importante comprender que un campo magnético cambiante produce un campo eléctrico en un espacio *vacío*. No se necesita un cable. Si está presente un cable, el campo eléctrico ejerce fuerzas sobre las cargas dentro del cable y produce una corriente. Pero el punto importante es que, incluso ante la ausencia del cable, el campo eléctrico está presente.

Si utilizamos estos resultados y nos concentramos en los campos y no en las corrientes, la situación es completamente simétrica: un campo magnético *cambiante* genera un campo eléctrico, y un campo eléctrico *cambiante* produce un campo magnético. Existe una relación íntima entre la electricidad y el magnetismo.

## Ondas electromagnéticas

### ✓ MATEMÁTICAS

Si el campo magnético cambia a una velocidad constante (es decir, si cada segundo cambia la misma magnitud), el campo eléctrico producido es constante. Un campo magnético rápidamente cambiante produce un campo eléctrico grande, y un campo magnético lentamente cambiante produce uno más pequeño. Sin embargo, si el campo magnético comienza a cambiar lentamente y luego aumenta su velocidad de cambio, el campo eléctrico comienza pequeño y se vuelve más

grande. Por lo tanto, es posible que un campo magnético cambiante produzca un campo eléctrico cambiante.

Las placas paralelas de la figura 12-23 muestran el efecto simétrico; el campo eléctrico cambiante produce un campo magnético. La velocidad de cambio del campo eléctrico determina la magnitud del campo magnético. Por lo tanto, un campo eléctrico cambiante puede producir un campo magnético cambiante.

---

**Pregunta** ¿Cómo usaría un campo eléctrico para generar un campo magnético cuya magnitud aumentara?

---

**Respuesta** El campo eléctrico debe cambiar lentamente al principio y aumentar de manera continua su velocidad de cambio.

---

Hemos analizado muchas “velocidades de cambio” y eso puede ser muy confuso, pero la recompensa para comprender el proceso vale el esfuerzo. Hemos descubierto una cadena secuencial de producciones de campos: un campo cambiante produce otro campo cambiante, y después este nuevo campo cambiante produce de nuevo el primer tipo de cambio, y así sucesivamente. Los dos campos se generan entre sí en el espacio vacío.

Sólo hemos argumentado que esto es posible, pero James Clerk Maxwell dedujo rigurosamente el proceso en la década de 1860. Maxwell fue capaz de demostrar que esto era una consecuencia de un conjunto de cuatro ecuaciones que él y otros habían desarrollado para describir la electricidad y el magnetismo y las numerosas conexiones entre ellos. Las ecuaciones, llamadas ecuaciones de Maxwell en honor de sus contribuciones, resumen toda la electricidad y el magnetismo.

Maxwell combinó estas ecuaciones en una sola, la cual tenía la misma forma que las ecuaciones que describen las ondas periódicas, ya sean ondas en una cuerda, en el agua, o de sonido. Los campos eléctricos y magnéticos con pulsaciones se pueden combinar para producir ondas que viajen por el espacio (figura 12-25). Según los cálculos de Maxwell, estas **ondas electromagnéticas** adoptan la forma de campos eléctricos y magnéticos con pulsaciones que viajan con una velocidad igual a la de la luz. En 1887, el físico alemán Heinrich Hertz pudo producir ondas electromagnéticas en un lado de una habitación y detectarlas en el otro. La existencia de las ondas electromagnéticas confirmó la idea de Faraday de que estos campos tienen identidades propias.

Se producen ondas electromagnéticas cuando se aceleran cargas eléctricas. Si las cargas tienen un movimiento oscilatorio periódico, la onda tendrá una frecuen-

## Razonamiento defectuoso

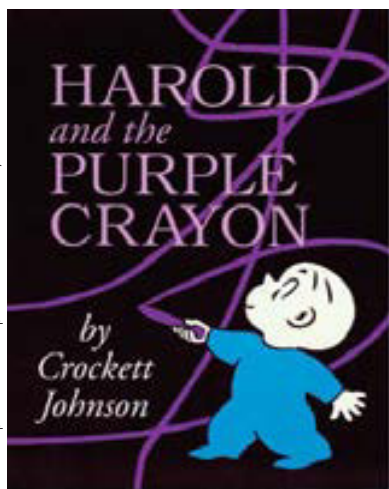


Todos bregamos con conceptos erróneos mientras creamos nuestras visiones del mundo. Incluso Isaac Newton cometió errores en su razonamiento. Él creía que “el éter luminoso” debe llenar todo el espacio para proporcionar un medio para la propagación de las ondas de la luz. Si zangoloteamos la gelatina en un lado de un tazón, el zangoloteo cruza el tazón. Newton sentía que era imposible que el zangoloteo atravesara un tazón vacío. **Explique cómo se propaga una onda electromagnética por el espacio vacío.**

---

**Respuesta** La onda electromagnética se propaga a través del espacio vacío al recrearse a sí misma. Un campo eléctrico cambiante crea un campo magnético cambiante: ondula por el campo magnético. A su vez, este campo magnético cambiante crea un campo eléctrico cambiante: ondula por el campo eléctrico. Y luego el proceso vuelve a comenzar. De algún modo es como la conocida historia para niños preescolares de *Harold and the Purple Crayon* de Crockett Johnson. En esta historia, Harold llega a donde quiere ir al dibujar para sí unas escaleras con su crayola morada y su imaginación.

---





## MAXWELL Unificación del espectro electromagnético

James Clerk Maxwell nació el 13 de junio de 1831, en una prominente familia de Edimburgo. El nombre original de su familia era Clerk antes que ocurriera un matrimonio entre los Clerk y los Maxwell. Su nombre “combinado” fue el resultado de manipulaciones legales que evitaban que la familia poseyera una sola propiedad extensa.

Maxwell fue educado en un ambiente completamente escocés, con faldas escocesas, idioma gaélico, y pronunciación gutural de la “r”. Su padre, a quien interesaba mucho la ciencia, fomentó esta inclinación. Asistió a la Edinburgh Academy y, en 1847, se inscribió en la Edinburgh University, donde destacados profesores le dieron la bienvenida. Uno de sus profesores era famoso por sus textos de física, algunos de los cuales se utilizaron en Estados Unidos hasta después de la Segunda Guerra Mundial. En 1850, Maxwell se inscribió en la Cambridge University, primero en Peterhouse College y después en la antigua guarida de Newton, Trinity College. Como estudiante, destacó en matemáticas y comenzó un estudio que duró toda su vida de los modelos matemáticos de los anillos de Saturno. Ganó el premio de matemáticas más prestigiado entre los matemáticos británicos y comenzó lo que sería una revisión maravillosamente productiva de los primeros experimentos electromagnéticos de Faraday.

Maxwell regresó como profesor a Aberdeen, Escocia, y después al King's College en Londres. Se casó, pero no tuvo hijos. Se



James Clerk Maxwell

© North Wind Picture Archives

retiró a su propiedad en Galloway para redactar un monumental *Treatise on Electricity and Magnetism* (*Tratado sobre electricidad y magnetismo*). Su trabajo en su campo generó importantes avances en la industria eléctrica, en la tecnología, y en todas las ramas de la ciencia física.

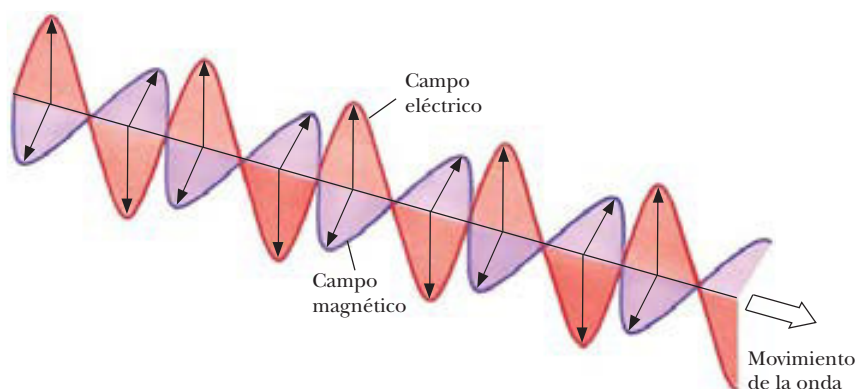
Aunque estaba retirado y enfermo, Maxwell diseñó y fundó el Cavendish Laboratory y fue su primer director. Éste fue el primer laboratorio experimental específicamente diseñado con blindaje para evitar la radiación y la vibración.

También desarrolló una igualmente vigorosa teoría cinética de los gases, la cual a su vez lo llevó a un trabajo de vanguardia en la termodinámica.

Continuó el trabajo sobre Saturno y contribuyó a la astrofísica, la visión del color, la óptica, la fotoelasticidad, la servomecánica y, a largo plazo, a la fotografía en color. Dejó un notable legado. En tributo, Albert Einstein siempre exhibió un retrato de Maxwell junto al de Isaac Newton. Perdura como uno de los máximos científicos en la historia.

—Pierce C. Mullen, historiador y autor

Fuente: C. W. Francis Everitt, *James Clerk Maxwell: Physicist and Natural Philosopher* (Nueva York: Scribner, 1975).



**Figura 12-25** La propagación de una onda electromagnética por el espacio. Los campos eléctrico y magnético están perpendiculares entre sí y respecto a la dirección en que se mueve la onda.

cia fija y, por lo tanto, una longitud de onda fija, de acuerdo con la relación entre velocidad, longitud de onda y frecuencia:

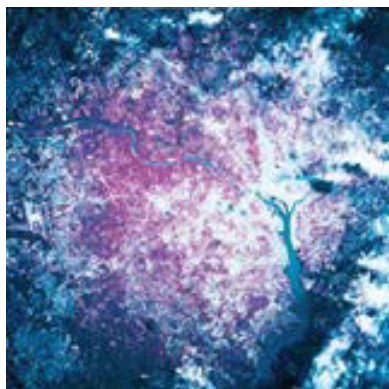
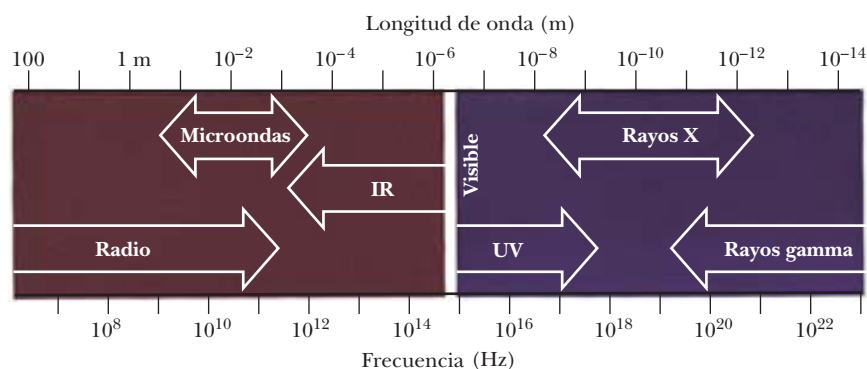
$$v = \lambda f$$

La ecuación de Maxwell requiere que la velocidad sea la de la luz, pero no impone restricciones en la frecuencia, como se indica en el diagrama del espectro electromagnético de la figura 12-26. Aunque todas estas ondas tienen la misma naturaleza básica, medios diferentes producen (y detectan) los diferentes rangos en la frecuencia. Los límites entre las diversas regiones nombradas no son perceptibles y, de hecho, se superponen bastante.

Las frecuencias más bajas y las longitudes de onda más altas pertenecen a las ondas de radio. Son producidas por aparatos grandes como las antenas de transmisión de radio. Las microondas también se producen de manera electrónica, pero los aparatos son más pequeños, y su tamaño va desde algunos milímetros hasta algunos metros. Estos dispositivos se utilizan en los hornos de microondas, el radar, y la transmisión a larga distancia de las llamadas telefónicas.

◀ velocidad = longitud de onda × frecuencia

**Figura 12-26** El espectro electromagnético.



© NASA

Fotografía infrarroja del área de Washington, D. C., con vista hacia el norte, que muestra el río Potomac en azul y la vegetación en rojo. Esta vista desde un transbordador espacial cubre 68 millas cuadradas.

Las frecuencias de la luz visible van de  $4.0$  a  $7.5 \times 10^{14}$  hertz. Aunque la luz visible ocupa sólo una región muy pequeña del espectro completo, es obvio que resulta muy importante para nosotros. Por el lado bajo, esta región está limitada por la radiación infrarroja (IR), las ondas cuyas longitudes de onda son demasiado largas (más allá del rojo) para ser observadas por el ojo humano. La radiación infrarroja es más perceptible cuando es emitida por objetos calientes, en especial los que generan un calor abrasador. Ésta es la radiación que usted siente a través de una habitación debido a una chimenea o a un aparato calefactor. La radiación que está más allá del violeta se conoce como ondas ultravioleta (UV). Éste es el componente de la luz solar que provoca el bronceado (y las quemaduras, si es excesivo). La luz visible y sus vecinas son producidas a nivel atómico, y sus propiedades son indicios valiosos sobre la estructura de la materia a nivel atómico.

Todos conocemos los rayos X por las visitas al médico o al dentista. Los rayos X tienen frecuencias altas y son muy penetrantes. Se producen mediante una rápida aceleración de los electrones en las máquinas de rayos X y se emiten mediante átomos. Los rayos gamma son una radiación de frecuencia todavía más alta que se origina en los núcleos de los átomos. En las secciones finales de este texto los estudiaremos con mayor detalle.

## Radio y TV

La radio es un medio para codificar las ondas electromagnéticas con información en las ondas de sonido, para que se puedan transmitir por el espacio, interceptarse, y convertirse de vuelta a sonido. La televisión es el mismo tipo de proceso, con la inclusión de información de video. Un micrófono transforma las ondas de sonido a una señal eléctrica. En una versión, las ondas de sonido hacen que vibre una bobina en un campo magnético. Esto produce una corriente en la bobina, la cual después se amplifica. Las frecuencias de audio están en el rango de 20 hertz a 20 kilohertz.

Si las frecuencias de audio se transmitieran directamente, sólo podría haber una estación de radio en cualquier región geográfica. En lugar de eso, la señal de audio se combina con una señal de transmisión. Una estación que transmite en el “1450 de su cuadrante” envía ondas con una frecuencia de 1450 kilohertz (también llamados kilociclos). Ésta es la *frecuencia portadora*. La señal de audio sirve para variar, o *modular*, la señal portadora. Dos métodos de modulación son la *amplitud modulada* (AM) y la *frecuencia modulada* (FM). La frecuencia del sonido determina la frecuencia de la modulación, y el volumen del sonido determina la amplitud de la modulación. En la radio AM la señal de audio hace que varíe la amplitud de la señal portadora; en la radio FM hace que varíe la frecuencia de la señal portadora (figura 12-27).

**Pregunta** Aunque la policía moderna y las sirenas de bomberos producen ondas de sonido en lugar de ondas de radio, se modulan. ¿Esta modulación es AM o FM?

**Respuesta** Debido a que estas sirenas tienen frecuencias oscilantes, deben ser FM.



© Ricky Corey/Dreamstime

Un plato receptor para señales de televisión satelital.

## Transmisiones en estéreo

Las frecuencias portadoras de las estaciones de radio AM están separadas por sólo 10 kilohertz. Esto significa que el espectro completo de 20 kilohertz no se puede emitir sin que se superpongan las estaciones. En la práctica, cada estación se limita a frecuencias de audio de hasta 5 kilohertz. El descubrimiento de la radio FM permitió la transmisión en un espectro más amplio de la frecuencia de audio (hasta 15 kilohertz), al igual que señales estereofónicas.

Pero, ¿cómo las estaciones de radio FM transmiten señales en estéreo sin afectar el desempeño de las radios más antiguas que fueron diseñadas para recibir señales monofónicas? Esto se hace al transmitir las dos señales de audio en la misma portadora, pero separadas por una frecuencia física. Se agrega una frecuencia de 38 kilohertz a una señal antes de transmitirla y después se resta en el receptor. Se aplican técnicas similares con las señales de audio y video para las transmisiones de televisión.

Para crear señales que se puedan reproducir en receptores estereofónicos o monofónicos, las señales que se trans-

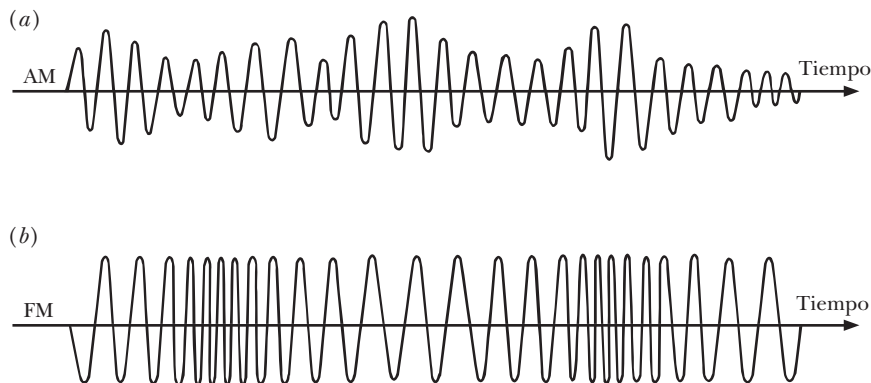


miten no son las señales para los canales izquierdo y derecho, sino la suma y la diferencia de los dos canales. Un receptor monofónico reproduce la suma de las señales e ignora la señal de diferencia, mientras que un receptor estereofónico suma y resta de manera electrónica estas señales, para recuperar los canales izquierdo y derecho.

En cualquiera de los casos, después la señal se amplifica y se envía a la antena, en donde hace que los electrones suban y bajen por el cable de la antena. Las aceleraciones de estos electrones producen ondas electromagnéticas que se transmiten. Cuando estas ondas chocan con la antena de su radio, hacen que los electrones de la antena avancen y retrocedan, lo cual produce corrientes oscilatorias. Aunque todas las estaciones cercanas se reciben al mismo tiempo, la radio se sintoniza para que sólo resuene una de ellas a la vez. Su radio amplifica la señal de esta estación.

La radio contiene circuitos eléctricos para filtrar la frecuencia portadora y sólo conserva la versión eléctrica de la información de sonido. A continuación estas señales se envían al altavoz para su reconversión a ondas de sonido. En una versión de un altavoz, las señales eléctricas generan un campo magnético que interactúa con el imán para mover un diafragma. A su vez, este diafragma mueve el aire para generar el sonido.

La asignación de los rangos posibles de las frecuencias portadoras para diversos tipos de transmisión es una responsabilidad gubernamental que se complicó con la historia del descubrimiento de avances como las técnicas de transmisión de FM estéreo y televisión. Las estaciones de radio AM transmiten entre 550 y 1500 kilohertz, la radio FM entre 88 y 108 megahertz, y la televisión en tres regiones entre 54 y 890 megahertz. Otras regiones se asignan a receptores de banda para



**Figura 12-27** Ondas de radio (a) AM, y (b) FM.

ciudadanos, embarcaciones, aviones, policía, operadores de radioaficionados, y comunicación satelital.

## Resumen

Los polos magnéticos se comportan igual que las cargas eléctricas: los polos iguales se repelen y los polos diferentes se atraen. Sin embargo, los polos magnéticos siempre ocurren en pares. Los imanes atraen algunos objetos, pero no tienen efecto sobre otros.

Los imanes no tienen efecto sobre las cargas inmóviles y no desvían las hojas de un electroscope. Por otra parte, un cable que transporta una corriente produce un campo magnético y es atraído o repelido por otros imanes o cables que transportan corriente. La fuerza en el cable siempre está perpendicular al cable y al campo magnético. Dos cables que transportan corriente se atraen entre sí si las corrientes están en la misma dirección; se repelen si las corrientes están en direcciones opuestas. La intensidad del campo para el magnetismo se define como  $2 \times 10^{-7}$  teslas a una distancia de 1 metro desde un cable que transporta una corriente de 1 ampere.

Todos los campos magnéticos se originan en circuitos con corriente. El magnetismo que ocurre en la naturaleza se origina en los circuitos con corriente a nivel atómico. El magnetismo terrestre tiene una intensidad en la superficie de cerca de  $5 \times 10^{-5}$  teslas (0.5 gauss) y lo provocan las corrientes eléctricas grandes que circulan en el interior fundido de la Tierra.

Una partícula cargada que se mueve en un campo magnético experimenta una fuerza en ángulos rectos a su velocidad y al campo magnético. La intensidad de la fuerza depende del ángulo entre el campo y el movimiento de la partícula. Está al máximo cuando están perpendiculares y es cero cuando están paralelos.

Si un cable y un campo magnético se mueven uno respecto al otro, se produce una corriente en el cable, siempre y cuando el movimiento no esté paralelo al cable o al campo. Esta corriente es más grande si el movimiento está perpendicular al campo y aumenta con la velocidad relativa. También ocurre una corriente en un circuito de cable si el campo magnético dentro del circuito varía con el tiempo. Un campo creciente produce una corriente en una dirección; un campo decreciente produce una corriente en la dirección opuesta.

Se utilizan las líneas de un campo para representar los campos magnéticos. El campo magnético es más fuerte en las regiones donde las líneas del campo están cercanas entre sí. Si el número de líneas de un campo magnético que atraviesa un circuito de cable cambia *por cualquier razón*, se produce una corriente en el circuito. El voltaje (y, por lo tanto, la corriente) generado en el circuito depende de la velocidad del cambio: entre más rápido es el cambio, mayor es el voltaje.

Existe una conexión estrecha entre campos eléctricos y magnéticos cambiantes. Un campo magnético cambiante puede generar un campo eléctrico cambiante, y un campo eléctrico cambiante puede generar un campo magnético cambiante, con lo que crean ondas electromagnéticas que se desplazan por el espacio vacío. Estas ondas se producen cuando se aceleran las cargas eléctricas. Cuando las cargas tienen un movimiento oscilatorio periódico, la onda tiene una frecuencia y una longitud de onda fijas. El espectro de estas ondas va desde las ondas de radio de muy baja frecuencia hasta la luz visible, los rayos X y los rayos gamma de alta frecuencia.





## TÉRMINOS IMPORTANTES

**ampere:** La unidad del Sistema Internacional para la corriente eléctrica. La corriente en cada uno de dos cables paralelos cuando la fuerza magnética por unidad de longitud entre ellos es  $2 \times 10^{-7}$  newtons por metro.

**campo magnético:** El espacio que rodea un objeto magnético, en donde se asigna a cada ubicación un valor determinado por la porción sobre una brújula colocada en esa ubicación. La dirección del campo está en la dirección del polo norte de la brújula.

**electroimán:** Un imán construido al envolver con cable un núcleo de hierro. Un electroimán se enciende y apaga al abrir y al interrumpir la corriente del cable.

**gauss:** Una unidad de la intensidad de un campo magnético;  $10^{-4}$  teslas.

**monopolo magnético:** Un polo magnético hipotético, aislado.

**onda electromagnética:** Una onda formada por un campo eléctrico y uno magnético oscilantes. En un vacío, las ondas electromagnéticas viajan a la velocidad de la luz.

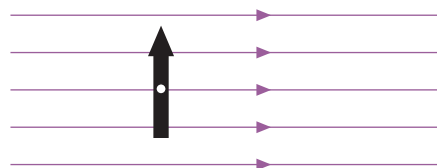
**polo magnético:** Un extremo de un imán, similar a una carga eléctrica.

**tesla:** La unidad en el sistema internacional para un campo magnético.

## PREGUNTAS CONCEPTUALES

1. Si le entregan tres barras de hierro, ¿cómo las utiliza para detectar cuál no está magnetizada?
2. Si faltan las etiquetas en un imán, ¿cómo puede determinar cuál es el polo norte?
3. Usted tiene tres barras de hierro, cada una de las cuales puede o no ser un imán permanente. Cada barra está pintada de verde en un extremo y de amarillo en el otro. Usted efectúa tres experimentos y encuentra que el extremo verde de la barra A atrae el extremo verde de la barra B, que el extremo amarillo de la barra A repele el extremo verde de la barra B, y que el extremo verde de la barra B repele el extremo amarillo de la barra C. ¿Cuál de esos tres resultados indica que la barra A debe ser un imán permanente? Explique.
4. Considere los experimentos descritos en la pregunta 3. ¿El extremo verde de la barra A atraería, repelería, o no tendría una interacción con el extremo verde de la barra C? Explique.
5. Usted tiene tres barras de hierro, cada una de las cuales puede o no ser un imán permanente. Cada barra está pintada de negro en un extremo y de blanco en el otro. Usted efectúa tres experimentos y encuentra que el extremo blanco de la barra A repele el extremo negro de la barra B, que el extremo negro de la barra A atrae el extremo blanco de la barra C, y que el extremo negro de la barra B atrae el extremo blanco de la barra C. ¿La barra C es un imán permanente? Explique.
6. Considere los experimentos descritos en la pregunta 5. ¿El extremo blanco de la barra A atraería, repelería, o no tendría una interacción con el extremo blanco de la barra C? Explique.
7. Si un imán de barra se rompe en dos pedazos, ¿cuántos polos magnéticos hay?
8. Denominamos los polos magnéticos de modo que polos iguales se repelen y polos distintos se atraen. ¿Sería posible utilizar una convención de denominación en donde los polos iguales se atraerán y los polos diferentes se repelerán? ¿Por qué sí o por qué no?
9. ¿Cómo es la dirección del campo magnético definida en cada punto en el espacio?
10. ¿Por qué no es posible que dos líneas de un campo magnético se crucen?

11. Las líneas de un campo magnético en una región se exhiben en la figura. La aguja de una brújula que gira libremente se suelta en la orientación mostrada. ¿La aguja rotará en sentido dextrógiro, levógiro, o no se moverá? Explique.

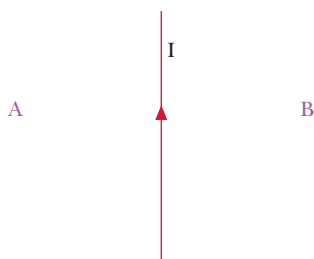


12. Oersted encontró que las líneas de un campo magnético alrededor de un cable que transporta corriente forman círculos y se acercan a sí mismas. Debido a que las líneas del campo para un imán de barra también se acercan a sí mismas, ¿qué implica esto respecto a la dirección de las líneas del campo dentro del imán? ¿Las líneas del campo apuntan de norte a sur o de sur a norte?
13. Cuando usted observa el eje de un solenoide de modo que la corriente circula en dirección dextrógiro, ¿mira en la dirección del campo magnético o en la dirección opuesta a él? Explique.
14. ¿Cómo cambiaría la fotografía de la figura 12-4 si la corriente se moviera en la dirección opuesta?
15. En la figura, usted observa el extremo de un cable recto largo. La corriente del cable se dirige hacia fuera de la página. En el punto A, ¿la dirección del campo magnético es hacia la izquierda, hacia la derecha, hacia arriba, hacia abajo, hacia dentro de la página, o hacia fuera de la página? ¿Cuál es la dirección en el punto B? Explique.

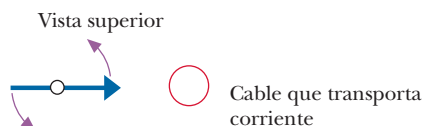


16. Un cable recto largo transporta una corriente en la dirección indicada en la figura. En el punto A, ¿la dirección del campo magnético es hacia la izquierda, hacia la derecha, hacia arriba, hacia abajo, hacia dentro de la página, o ha-

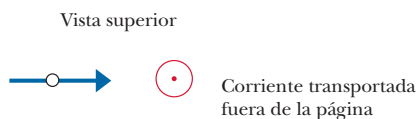
cia fuera de la página? ¿Cuál es la dirección en el punto B? Explique.



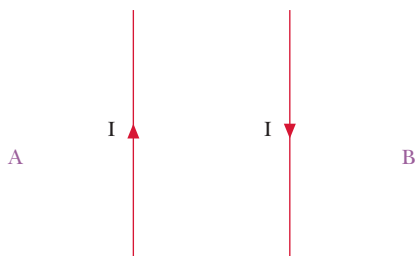
17. La figura exhibe una vista superior de una brújula junto a un cable recto largo. Una flecha indica el polo norte de la brújula. Cuando se cierra un interruptor, se establece una corriente en el cable, y la aguja de la brújula inicialmente gira según se indica. ¿La dirección de la corriente en el cable es hacia dentro o hacia fuera de la página? Explique.



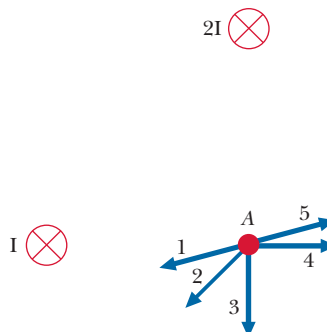
18. La figura exhibe una vista superior de una brújula junto a un cable recto largo. Una flecha indica el polo norte de la brújula. Cuando se cierra un interruptor, la corriente se dirige hacia fuera de la página, según se indica. ¿La aguja de la brújula al principio girará en sentido dextrógiro o levógiro? Explique.



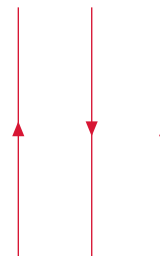
19. En los circuitos eléctricos y las líneas telefónicas, dos cables que transportan corriente en direcciones opuestas se trenzan juntos. ¿De qué manera reduce esto los campos magnéticos que rodean los cables?
20. ¿Puede utilizar una brújula para localizar los cables eléctricos ubicados dentro de las paredes de su casa? Explique.
21. Dos cables rectos largos transportan corrientes idénticas en direcciones opuestas, igual que en la figura. En los puntos A y B, ¿la dirección del campo magnético es hacia la izquierda, hacia la derecha, hacia arriba, hacia abajo, hacia dentro de la página, o hacia fuera de la página? Explique.



22. Dos cables llevan corriente hacia el interior de la página, cómo se indica. Un cable lleva una corriente  $I$  y el otro lleva una corriente  $2I$ . ¿Cuál de las flechas representa mejor la dirección del campo magnético en el punto A, que es la misma distancia desde ambos cables? Explique.

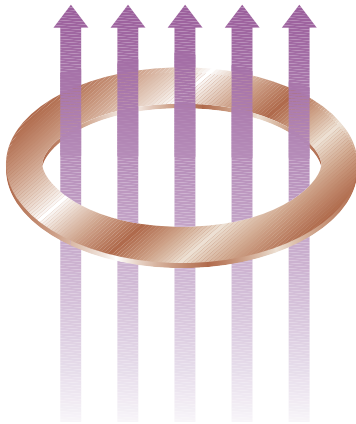


23. En la novela *Moby Dick* de Melville, el capitán Ahab recuperó la confianza de su tripulación cuando reparó la brújula dañada por una tormenta eléctrica, para que apuntara hacia el sur. ¿Cómo pudo haber hecho esto?
24. La piedra imán (magnetita) es una roca ígnea, que se forma a partir de material fundido. ¿Cómo supone que se magnetiza?
25. ¿Qué espera que le ocurrirá a la intensidad del magnetismo de un imán de barra que se deja caer sobre un suelo duro?
26. ¿Esperaría que se magnetizara la cabeza de un martillo de acero? Explique.
27. Dos cables rectos largos transportan corriente en direcciones opuestas. La corriente en el cable 1 es el doble de la corriente en el cable 2. Si la fuerza magnética neta por unidad de longitud en el cable 1 es 4 newtons por metro, ¿cuál es la fuerza magnética por unidad de longitud en el cable 2?
28. Tres cables rectos largos transportan una corriente idéntica en las direcciones señaladas en la figura. ¿Cuál es la dirección de la fuerza neta en el cable de la derecha?
29. ¿Cómo se define la unidad de la corriente?



30. ¿Cómo se define la unidad de la carga?
31. Uno de los polos magnéticos de la Tierra está en la Antártida. ¿Es un polo norte magnético o un polo sur magnético?
32. ¿Por qué sería más adecuado llamar a un polo norte magnético un polo magnético "que busca el norte"?
33. Si quiere caminar hacia el Polo Norte geográfico mientras está en Portland, Oregon, ¿cuál dirección de una brújula seguiría?
34. ¿Qué tan lejos del Polo Norte geográfico apunta una brújula en la ciudad de Nueva York?

35. ¿Por qué hay más rayos cósmicos en la Antártida que en Hawai?
36. Podemos modelar que el campo magnético de la Tierra se debe a un solo circuito que lleva una corriente grande y que se desplaza alrededor del ecuador justo bajo la superficie. En este modelo, ¿la dirección de la corriente es de este a oeste o de oeste a este? ¿Por qué?
37. Si una partícula cargada viaja en línea recta, ¿puede afirmar que no hay un campo magnético en esa región del espacio? Explique.
38. ¿Puede acelerar una partícula cargada inmóvil con un campo magnético? ¿Y con un campo eléctrico? Explique.
39. Un protón y un electrón con la misma velocidad entran a un imán de flexión con un campo magnético perpendicular a su velocidad. Compare los movimientos del protón y el electrón.
40. Un imán produce un campo magnético que apunta verticalmente hacia arriba. ¿En qué dirección actúa la fuerza sobre un protón si entra a esta región con una velocidad horizontal hacia el este?
41. Un circuito conductor está plano sobre el suelo. El polo norte de un imán en barra se acerca al circuito. Conforme se acerca el imán al circuito, ¿el campo magnético creado por la corriente inducida apuntará hacia arriba o hacia abajo? ¿Cuál es la dirección de la corriente en el circuito? Explique.
42. Ahora el imán de la pregunta 41 se levanta hacia arriba. ¿Cuál de sus respuestas cambiará, de ser el caso? Explique.
43. Considere el caso en donde el polo sur de un imán en barra se mueve hacia un anillo conductor de cobre. ¿Las líneas del campo creadas por la corriente inducida apuntan hacia el imán en barra o se alejan de él? Explique.
44. Considere el caso en donde el polo sur de un imán en barra se aleja de un anillo conductor de cobre. ¿Las líneas del campo creadas por la corriente inducida apuntan hacia el imán en barra o se alejan de él? Explique.
45. Un anillo de cobre se orienta perpendicular a un campo magnético uniforme. Si de repente el anillo se mueve en la



Preguntas 45 y 46

- dirección de las líneas del campo, ¿la magnitud del campo magnético neto en el centro del circuito (el campo uniforme más el campo inducido) será mayor, igual, o menor que la magnitud del campo uniforme? Explique.
46. Un anillo de cobre se orienta perpendicular a un campo magnético uniforme. El anillo se estira rápido, de modo que su radio se duplica en poco tiempo. Cuando el anillo se estira, ¿la magnitud del campo magnético neto en el centro del circuito (el campo uniforme más el campo inducido) es mayor, igual, o menor que la magnitud del campo uniforme? Explique.
47. La inserción rápida del polo norte de un imán en barra en una bobina de cable hace que la aguja de un medidor se desvíe hacia la derecha. Describa dos acciones que harán que la aguja se desvíe hacia la izquierda.
48. ¿Cómo puede producir una corriente en un solenoide al girar un imán pequeño dentro de la bobina?
49. Cuando se conecta un transformador en una tomacorriente de pared, produce una electricidad de corriente alterna de 9 volts para un reproductor de cintas portátil. ¿Está conectada al tomacorriente de pared la bobina con la cantidad de vueltas más grande o más pequeña? ¿Por qué?
50. Si tuviera un automóvil antiguo que necesitara una batería de 6 volts para encender el motor, ¿podría utilizar una batería de 12 volts con un transformador para obtener el voltaje de salida necesario? ¿Cómo?
51. ¿Cuál es el propósito de utilizar un conmutador en un motor?
52. ¿Qué efecto tiene un conmutador en la salida eléctrica de un generador?
53. Describa una onda electromagnética mientras se propaga por el espacio vacío.
54. ¿Cómo se generan las ondas electromagnéticas?
55. ¿Cuál de las siguientes no es una onda electromagnética: de radio, de televisión, de luz azul, de luz infrarroja, o de sonido?
56. ¿Cuál de las ondas electromagnéticas siguientes tiene la frecuencia más baja: de radio, de microondas, de luz visible, de luz ultravioleta, o de rayos X? ¿Cuál tiene la frecuencia más alta?
57. ¿Cuál es la diferencia entre los rayos X y los rayos gamma?
58. ¿Qué tan rápido viajan por el vacío los rayos X?
59. ¿Cómo codifica el sonido una estación de radio AM?
60. ¿Cómo transmite el sonido una estación de radio FM?
61. ¿En qué frecuencia transmite la estación de radio FM 102.1?
62. ¿Qué significa que un locutor diga que “usted escucha radio 1380”?

## EJERCICIOS

1. El récord para un campo magnético uniforme son 45 T. ¿Cómo se expresa este campo en gauss?
2. ¿Cuál es el campo magnético (expresado en gauss) de un imán de refrigerador con un campo magnético de 0.3 T?
3. Se ha medido que el campo magnético en el ecuador de Júpiter es 4.3 G. ¿A cuánto equivale este campo expresado en teslas?
4. El campo magnético asociado con las manchas solares está en el orden de 1500 G. ¿Cuántos teslas es esto?
5. Un electrón tiene una velocidad de  $3 \times 10^6$  m/s perpendicular a un campo magnético de 2 T. ¿Cuáles fuerza y aceleración experimenta el electrón?
6. ¿Cuáles fuerza y aceleración experimentaría un protón bajo las condiciones del ejercicio 5?
7. Una bola metálica con una masa de 2 g, una carga de  $1 \mu\text{C}$ , y una velocidad de 40 m/s entra a un campo magnético de 30 T. ¿Cuáles son la fuerza y la aceleración máximas de la bola?
8. Una bola muy pequeña con una masa de 0.1 g tiene una carga de  $10 \mu\text{C}$ . Si entra a un campo magnético de 10 T con una velocidad de 30 m/s, ¿cuáles son la fuerza y la aceleración máximas que experimenta la bola?
- ▲ 9. Si quisiera que la fuerza magnética máxima sobre la bola del ejercicio 7 fuera igual a la fuerza gravitacional sobre la bola, ¿cuál carga necesitaría darle?
- ▲ 10. ¿Cuál velocidad se necesitaría en el ejercicio 8 para que la fuerza magnética máxima fuera igual a la fuerza gravitacional?
- ▲ 11. Una gota de tinta con una carga  $q = 3 \times 10^{-9}$  C se mueve en una región que contiene un campo eléctrico y un campo magnético. La intensidad del campo eléctrico es  $3 \times 10^5$  N/C, y la intensidad del campo magnético es 0.2 T. ¿A qué velocidad debe moverse la partícula perpendicular al campo magnético para que sean iguales las magnitudes de las fuerzas eléctrica y magnética?
- ▲ 12. ¿Cómo cambiaría su respuesta al ejercicio 11 si se duplicara la carga en la gota de tinta?
- ▲ 13. Una partícula con una carga  $q = 5 \mu\text{C}$ , y una masa  $m = 6 \times 10^{-5}$  kg se mueve paralela a la superficie terrestre a una velocidad de 1000 m/s. ¿Cuál intensidad mínima de un campo magnético se requeriría para equilibrar la fuerza gravitacional sobre la partícula?
- ▲ 14. ¿Cuál intensidad mínima de un campo magnético se requiere para equilibrar la fuerza gravitacional sobre un protón que se mueve a una velocidad de  $3 \times 10^6$  m/s?
15. Se utiliza un transformador para convertir la electricidad casera de 120 V a 9 V para emplearse en un reproductor de CDs portátil. Si la bobina principal conectada a la toma de corriente tiene 400 circuitos, ¿cuántos circuitos tendrá la bobina secundaria?
16. El voltaje en las líneas que transportan energía eléctrica a los hogares suele ser 2000 V. ¿Cuál es la razón requerida de los circuitos en las bobinas principal y secundaria del transformador para reducir el voltaje a 120 V?
17. Se emplea un transformador para reducir el voltaje de 120 V a 6 V para usarse con una rasuradora eléctrica. Si la rasuradora extrae una corriente de 0.5 A, ¿cuál corriente se extrae de las líneas de 120 V? ¿Cuál es la razón de los circuitos en las bobinas principal y secundaria del transformador?
18. Su toma de corriente de 120 V está protegida por un interruptor de circuitos de 20 A. ¿Cuál es la corriente máxima que puede suministrar a un aparato que utiliza un transformador que tiene en la bobina secundaria una décima parte de los circuitos que tiene en la bobina principal?
19. Usted utiliza un transformador con 800 circuitos en la bobina principal y 80 circuitos en la secundaria. Si la entrada de 120 V suministra 2 A, ¿cuál es la corriente en el aparato conectado al transformador?
20. Usted utiliza un transformador con 800 circuitos en la bobina principal y 80 circuitos en la secundaria. Si el transformador se conecta a una toma de corriente de 120 V protegida por un interruptor de circuitos de 20 A, ¿cuál es la clasificación de corriente máxima de un aparato que se pueda utilizar con este transformador?
21. ¿Cuánto tarda una señal de radio de la Tierra en alcanzar la Luna cuando está a 384 000 km de distancia?
22. Los satélites de comunicaciones que transportan mensajes telefónicos entre la ciudad de Nueva York y Londres tienen órbitas alrededor del ecuador a una altitud de 13 500 km. ¿Aproximadamente cuánto tarda un mensaje en viajar entre estas dos ciudades a través del satélite?
23. Muchos hornos de microondas utilizan microondas con una frecuencia de  $2.45 \times 10^9$  Hz. ¿Cuál es la longitud de onda de esta radiación y cómo se compara con el tamaño de un horno convencional?
24. Una máquina de rayos X utilizada para terapia de radiación produce rayos X con una frecuencia máxima de  $2.4 \times 10^{20}$  Hz. ¿Cuál es la longitud de onda de estos rayos X?
25. La luz ultravioleta que provoca quemaduras de sol tiene una longitud de onda normal de 300 nm. ¿Cuál es la frecuencia de estos rayos?
26. El isótopo radiactivo de uso más común en la terapia de radiaciones es el cobalto 60. Genera dos rayos gamma con longitudes de onda de  $1.06 \times 10^{-12}$  m y  $9.33 \times 10^{-13}$  m. ¿Cuáles son las frecuencias de estos rayos gamma?



© Martin Dohm/Science Photo Library/Photo Researchers

27. ¿Cuál es el rango de las longitudes de onda de la radio AM?
28. ¿Cuál es el rango de las longitudes de onda de la radio FM?
29. ¿Cuál es la longitud de onda de la onda portadora para una estación de radio AM ubicada en el 1090 del cuadrante?
30. ¿Cuál es la longitud de onda más corta utilizada para las transmisiones de televisión?



# Interludio



© Floyd Dean / Taxi / Getty Images

*Las interacciones cuántico-mecánicas de las moléculas de agua determinan la forma de un copo de nieve.*

# La historia del cuanto

En 1887, el físico alemán Heinrich Hertz generó chispas en una máquina electrostática y consiguió que una chispa saltara a través de la abertura de un circuito de cable aislado en el otro lado del laboratorio. Hertz había transmitido la primera señal de radio a una distancia de algunos metros. A Hertz no le interesaban las implicaciones sociales de enviar señales; intentaba corroborar la predicción de James Clerk Maxwell de la existencia de ondas electromagnéticas. Hertz también mencionó el hecho curioso de que cuando la luz ultravioleta iluminaba su circuito, se producían más chispas.

El siglo XIX había sido la época de los motores de vapor y el calor. Es natural que ocurrieran enormes avances en el estudio de la termodinámica: el comportamiento de los gases bajo diferentes condiciones de presión y temperatura. Para 1890, áreas de fenómenos confusos completamente nuevas planteaban inmensos desafíos intelectuales a los científicos. En 1895, Wilhelm Roentgen descubrió una nueva forma de radiación que emanaba de un dispositivo electromagnético conocido como tubo de rayos catódicos. El año siguiente, Henri Becquerel observó que un trozo de uranio emitía cierto tipo de energía que irradiaba a través de la madera de su escritorio y nublaba sus placas fotográficas. En 1900, Max Planck miraba perplejo los resultados inusuales cuando calculaba el espectro de radiación de los objetos calentados.

Algunas de las mejores mentes del siglo XX lidiaban con estos problemas de la radiación y la materia, los hechos experimentales y las teorías. De manera continua recibían información increíble. Fue una crisis en el proceso del descubrimiento mismo, nacida en la agitación y la confusión. ¿En qué iban a creer? Un filósofo de esa época lo expresó así: “Los sentidos no mienten. Simplemente no nos dicen la verdad.”

La única resolución posible era una revolución en la visión del mundo de la física. Se descartaron las ideas que se habían dado como hecho, y lo increíble se volvió creíble. El núcleo de esta revolución parecía bastante inocente: la energía existe en “pedazos” o unidades cuánticas. A primera vista, la cuantización no parece tan radical. Las pinturas de los impresionistas franceses parecían normales cuando se observaban a la distancia, y nuestro peso parece continuo, aunque en realidad sea la suma de los pesos de

**Nos debe sorprender que las moléculas de gas se comporten de manera muy similar a las bolas de billar, y no debe sorprendernos que los electrones no lo hagan.**

**—Hermann Bondi**

los átomos separados. Pero no sólo es cuestión de sumar los numerosos componentes diminutos de esta nueva perspectiva de separación para obtener el todo; los componentes diminutos controlan el carácter del todo.

La naturaleza cuántica de la energía fue el primero de tres cambios que condujeron a esta nueva física. Aparecieron nuevas ideas sobre la naturaleza de la luz y, por último, nuevas ideas sobre la naturaleza de la materia. Juntos, estos cambios revelaron el carácter del universo, desde la forma de los copos de nieve hasta la existencia de las estrellas de neutrones.

Aunque pudiera parecer más fácil sencillamente aprender “las respuestas”, resultan increíbles sin conocer los experimentos, los conflictos, los debates y las eventuales resoluciones que condujeron a ellas. Conforme siga la pista de estos descubrimientos, tenga en mente el comentario de Sir Hermann Bondi: “Nos debe sorprender que las moléculas de gas se comporten de manera muy similar a las bolas de billar, y no debe sorprendernos que los electrones no lo hagan”.



© Bettmann/Corbis

Heinrich Hertz





# 13

## Fronteras

Cuando Albert Einstein concibió la teoría general de la relatividad, creía que el Universo era estático; el Universo no se expandía ni contraía. Para explicar esto, incorporó en sus ecuaciones el término *constante cosmológica*, para evitar que el Universo se colapsara bajo la influencia de su propia gravedad. Más adelante, cuando los astrónomos comprobaron que el Universo se expandía bastante rápido, Einstein sintió que la introducción de la constante cosmológica era su mayor pifia. ¿El Universo se expandirá por siempre, o se frenará la expansión y el Universo se colapsará en sí mismo?

---

(Consulte la respuesta a esta pregunta en la página 260.)

---



© NASA

La cabeza de serpiente marina imaginaria en esta fotografía del Telescopio Espacial Hubble de la nebulosa Águila en realidad es una nube de hidrógeno molecular y polvo, en la cual se forman estrellas nuevas.



La visión del mundo de la física es dinámica. De manera constante se proponen, debaten y prueban ideas contra el mundo material. Algunas sobreviven el escrutinio de la comunidad de físicos; otras, no. La inclusión de nuevas ideas a menudo obliga a la modificación o el rechazo absoluto de ideas antes aceptadas. Algunas ideas firmemente aceptadas en la visión del mundo son muy difíciles de descartar; sin embargo, a la larga la experimentación vence nuestras tendencias personales.

En este capítulo analizamos algunas áreas seleccionadas acerca de las fronteras de la investigación de la física. Las ideas presentadas en este capítulo no están tan firmemente establecidas como las expuestas en capítulos anteriores. Algunas de las ideas examinadas aquí sobrevivirán y otras, no. Pero ésa es la naturaleza de una ciencia en evolución.

En su búsqueda de una física nueva, los investigadores no tienen libertad absoluta para generar cualquier teoría que les plazca. Las teorías nuevas deben coincidir con el cuerpo cada vez más grande de resultados experimentales y ser compatibles con las teorías establecidas. Esto impone restricciones muy estrictas sobre lo que se puede proponer.

En el primer capítulo citamos a Newton: “No sé qué le parezca al mundo, pero yo me considero un niño que juega en la playa, y se divierte de vez en cuando al hallar un guijarro más liso o una concha más bonita de lo común, mientras el gran océano de la verdad yace por descubrir ante mí.” Con la ayuda de algunos colegas, vayamos a buscar conchas más bonitas.

## Ondas gravitacionales

Cuando Einstein propuso su teoría general de la relatividad en 1916, también postuló la existencia de las ondas gravitacionales. En muchas maneras, las ondas gravitacionales son similares a las ondas electromagnéticas, las cuales analizamos en el capítulo 12. La aceleración de las cargas eléctricas produce las ondas electromagnéticas que experimentamos, como la luz, la radio, el radar, la televisión y los rayos X. Las ondas gravitacionales son el resultado de la aceleración de las masas. Ambos tipos de ondas transportan energía por el espacio, viajan a la velocidad de la luz ( $3 \times 10^8$  m/s), y su intensidad disminuye como el cuadrado inverso de la distancia desde el origen.

Debido a que una radio de 10 dólares y nuestros ojos detectan tan fácilmente las ondas electromagnéticas, ¿por qué no se han detectado las ondas gravitacionales? La razón principal es que la fuerza gravitacional es  $10^{43}$  veces más débil que la fuerza electromagnética. Excepto en los casos más favorables, las ondas gravitacionales son más débiles por este mismo factor. Además, los detectores son menos sensibles para interceptar las ondas gravitacionales por cuando menos otro factor de  $10^{43}$ .

La detección de las ondas gravitacionales es uno de los retos más fundamentales en la física moderna. Joseph Weber, un físico en la University of Maryland, sentó las bases de los esfuerzos para detectar las ondas gravitacionales, en la década de 1960. Utilizó como detector un cilindro macizo y grande de 2 metros de longitud que pesaba varias toneladas. Una onda gravitacional que pasa provoca vibraciones en la longitud del cilindro, debido a las diferencias en las fuerzas de los átomos en las diferentes partes del cilindro. El sistema de detección es sorprendentemente sensible; puede detectar cambios en la longitud del cilindro de  $2 \times 10^{-16}$  metros, aproximadamente una quinta parte del radio de un protón. Sin embargo, un cilindro puede vibrar por muchas otras razones, como el paso de los camiones. Para eliminar estas vibraciones, Weber utilizó dos cilindros a 1000 millas de distancia uno del otro y requirió que ambos vibraran juntos.

Aunque puede haber muchas fuentes de ondas gravitacionales, sólo algunas deben emitir señales lo bastante fuertes y estar dentro del alcance de los instrumentos actuales. Los detalles de los diversos procesos no se comprenden bien, de modo que los cálculos son estimados aproximados. Cuando ocurre una supernova, debe emitir una ráfaga grande de ondas gravitacionales. Este proceso puede emitir un pulso bastante grande para ser detectado, pero se espera que ocurra sólo una vez cada 15 años dentro de la galaxia. Asimismo un par de estrellas de neutrones

**Figura 13-1** Vista aérea de la estación final y un brazo de la planta LIGO en Louisiana.



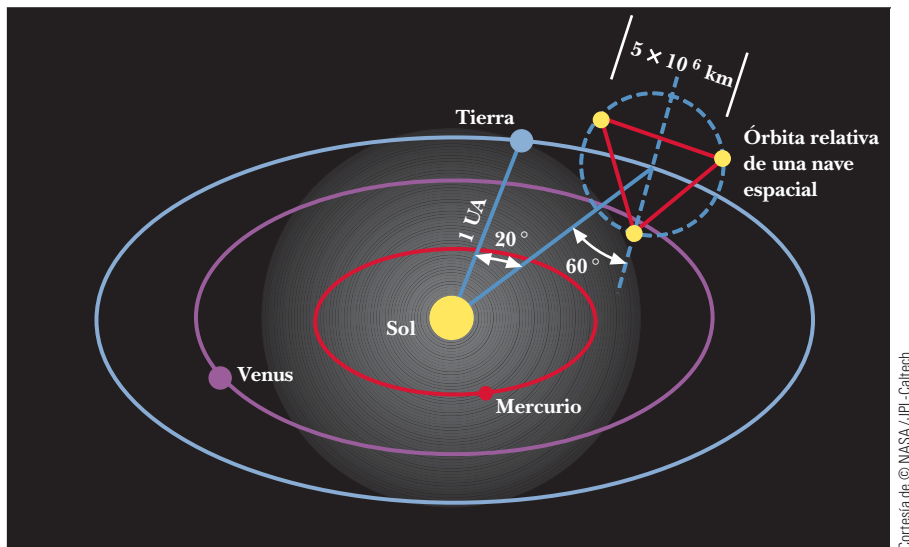
Cortesía de © Caltech / LIGO

o agujeros negros que orbitan entre sí en un rango cercano deben emitir intensas ondas gravitacionales.

En 1991, el Congreso estadounidense aprobó la construcción del Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory (LIGO), el cual consta de plantas idénticas en los estados de Washington y Louisiana (figura 13-1), lugares muy separados para eliminar vibraciones extrañas. Cada planta busca cambios en la distancia entre pares de espejos a una distancia de 4 kilómetros uno del otro. Las distancias se miden al dividir un haz láser en dos haces que viajan en ángulos rectos entre sí, rebotan en los espejos, y se vuelven a combinar. Cuando se vuelven a combinar los láseres, los cambios muy ligeros en las distancias hacia los espejos distantes alteran el brillo de la luz. A fin de cuentas, este observatorio debe ser un millón de veces más sensible que el experimento de Weber.

La siguiente generación de detectores de ondas gravitacionales se construirá en el espacio. La Laser Interferometer Space Antenna (LISA) tendrá tres satélites en las esquinas de un triángulo equilátero que tiene 5 millones de kilómetros por lado. El grupo de satélites estará 20 grados detrás de la Tierra en su órbita alrededor del Sol, como se señala en la figura 13-2. La técnica experimental es la misma que para el LIGO, pero los brazos más grandes aportarán una sensibilidad en la banda de ondas gravitacionales de baja frecuencia de 0.0001 a 1 hertz, comparada con la banda de alta frecuencia del LIGO de 10 a 1000 hertz. En la banda de baja frecuencia, LISA observará las ondas gravitacionales generadas por los sistemas binarios o por los agujeros negros con masas colosales en el centro de muchas galaxias, entre ellas nuestra Vía Láctea. El programa para el verano de 2005 preveía que LISA estuviera en funcionamiento en 2013.

Aunque no tenemos evidencia directa de las ondas gravitacionales, existe evidencia indirecta muy sólida de su existencia. En 1974, Joseph Taylor y Russell Hulse descubrieron un par de estrellas de neutrones que orbitaban entre sí a corta distancia. Las masas de las estrellas de neutrones son ligeramente más grandes que la de nuestro Sol, pero sólo tienen 10 kilómetros de diámetro. En estas densidades tan inmensas, los electrones y los protones se combinan para formar neutrones, de modo que la estrella está hecha casi por completo de neutrones. Las dos estrellas de neutrones orbitan entre sí cada 8 horas y alcanzan velocidades orbitales de 0.13% la velocidad de la luz. Una de las estrellas de neutrones es un pulsar que emite un pulso de radiación cada 59 milisegundos. Esto funciona igual que un reloj y es tan



**Figura 13-2** La órbita de los satélites de LISA.

bueno como cualquier reloj atómico que tengamos en la Tierra. Este reloj permite mediciones muy precisas de las órbitas, y 30 años de mediciones indican que el periodo orbital disminuye. De hecho, disminuye a precisamente la velocidad esperada por la pérdida de energía debido a la radiación gravitacional, de acuerdo con la teoría general de la relatividad de Einstein. El premio Nobel de física de 1993 se otorgó a Taylor y Hulse por este trabajo.

Los físicos esperan pronto detectar directamente las ondas gravitacionales; es sólo cuestión de continuar desarrollando la tecnología para mejorar la sensibilidad de los detectores.

## Teorías unificadas

La visión de que los bloques de construcción elementales en la naturaleza son los 6 leptones, 6 quarks y 13 partículas de intercambio es una enorme simplificación de los miles de partículas o nucleares descubiertas desde 1972.\* La lista de partículas elementales tiene un total de 25, un número razonablemente pequeño para crear los numerosos y diversos materiales en el mundo. Pero, ¿podemos reducir todavía más la complejidad?

El esquema actual contiene dos clases de partículas muy distintas: los leptones y los quarks. Los leptones tienen unidades en números enteros de la carga del electrón, mientras que los quarks tienen cargas que son múltiplos de una tercera parte de la unidad básica. Los quarks participan en la interacción fuerte a través de su color, mientras que los leptones no tienen color y no participan. Los leptones se observan como partículas libres, pero los quarks todavía deben aislarse; de hecho, la teoría actual predice que no pueden aislarse. No han ocurrido observaciones que indiquen que los leptones se puede convertir en quarks, y viceversa. ¿Por qué debe haber dos clases? ¿Por qué no sólo una?

Asimismo, tenemos cuatro fuerzas distintas: gravitacional, electromagnética, débil y fuerte (o color). Cada una parece tener su propia intensidad, y hay tres dependencias de la distancia diferentes, y 13 partículas de intercambio distintas. ¿Por qué debe haber cuatro fuerzas? ¿Por qué no sólo una?

Los físicos han formulado preguntas similares durante mucho tiempo y han buscado reducir al máximo el número de partículas y de fuerzas, idealmente a una clase de partículas y una fuerza. Los teóricos no pretenden eliminar (o pasar por alto) las diferencias que son muy evidentes, sino más bien mostrar que todas estas son manifestaciones de algo mucho más básico y, por lo tanto, más elemental.

\*Escrito con ayuda de William Hiscock, Department of Physics, Montana State University.

Se ha avanzado mucho. Antes del inicio del siglo XX, Maxwell fue capaz de demostrar que la electricidad y el magnetismo en realidad eran dos aspectos diferentes de una fuerza común, la fuerza electromagnética. Durante la década de 1960, Sheldon Glashow, Steven Weinberg y Abdus Salam desarrollaron la teoría electrodébil, que unificó las interacciones débiles y electromagnéticas.

La teoría electrodébil y la teoría del color de la interacción fuerte son los componentes principales del *modelo estándar* de las partículas elementales que evolucionó a principios de la década de 1970. Este modelo parece ser capaz de explicar cada experimento que se realiza. Sin embargo, aunque el modelo parece estar completo, su complejidad matemática es tal que muchos de los cálculos no pueden efectuarse con las técnicas disponibles en la actualidad.

Los esfuerzos para la unificación continúan; se ha logrado algunos éxitos al combinar la interacción electrodébil en lo que se denomina las *grandes teorías unificadas*. Estas teorías predicen que el número de barión no se conserva estrictamente, y como consecuencia, el protón debe desintegrarse, aunque el tiempo de vida predicho excede por mucho la edad actual del Universo. Hasta el momento, los experimentos no han presenciado ningún indicio de la desintegración del protón, y esto ha descartado algunas de las grandes teorías unificadas más sencillas.

Si tienen éxito los esfuerzos para producir una gran teoría unificada, todavía la fuerza gravitacional existirá de manera separada. Para alcanzar la meta definitiva, la gravedad también debe incluirse en una “teoría de todo” definitiva. Desde 1984 muchos físicos han trabajado en una candidata prometedora para tal teoría, la teoría de la *supercadena*. En la teoría de la supercadena, los objetos fundamentales, a partir de los cuales se crean toda la materia y las fuerzas, no son partículas de puntos, sino circuitos diminutos de materiales que no pueden subdividirse. El tamaño de estos circuitos define la distancia más pequeña en la naturaleza, la cual en casi todas las teorías de la supercadena es la *longitud de Planck*, alrededor de  $10^{-35}$  metros, más de un trillón de veces más pequeña que un protón. La longitud de Planck proviene de combinar la gravedad con la constante de Planck  $h$  de la mecánica cuántica. Aunque el experimento todavía debe confirmar cualquiera de estas simplificaciones o unificaciones propuestas, los físicos teóricos siguen analizando cuáles tipos de modelos fundamentales sencillos son compatibles con lo que ya se conoce.

## Cosmología

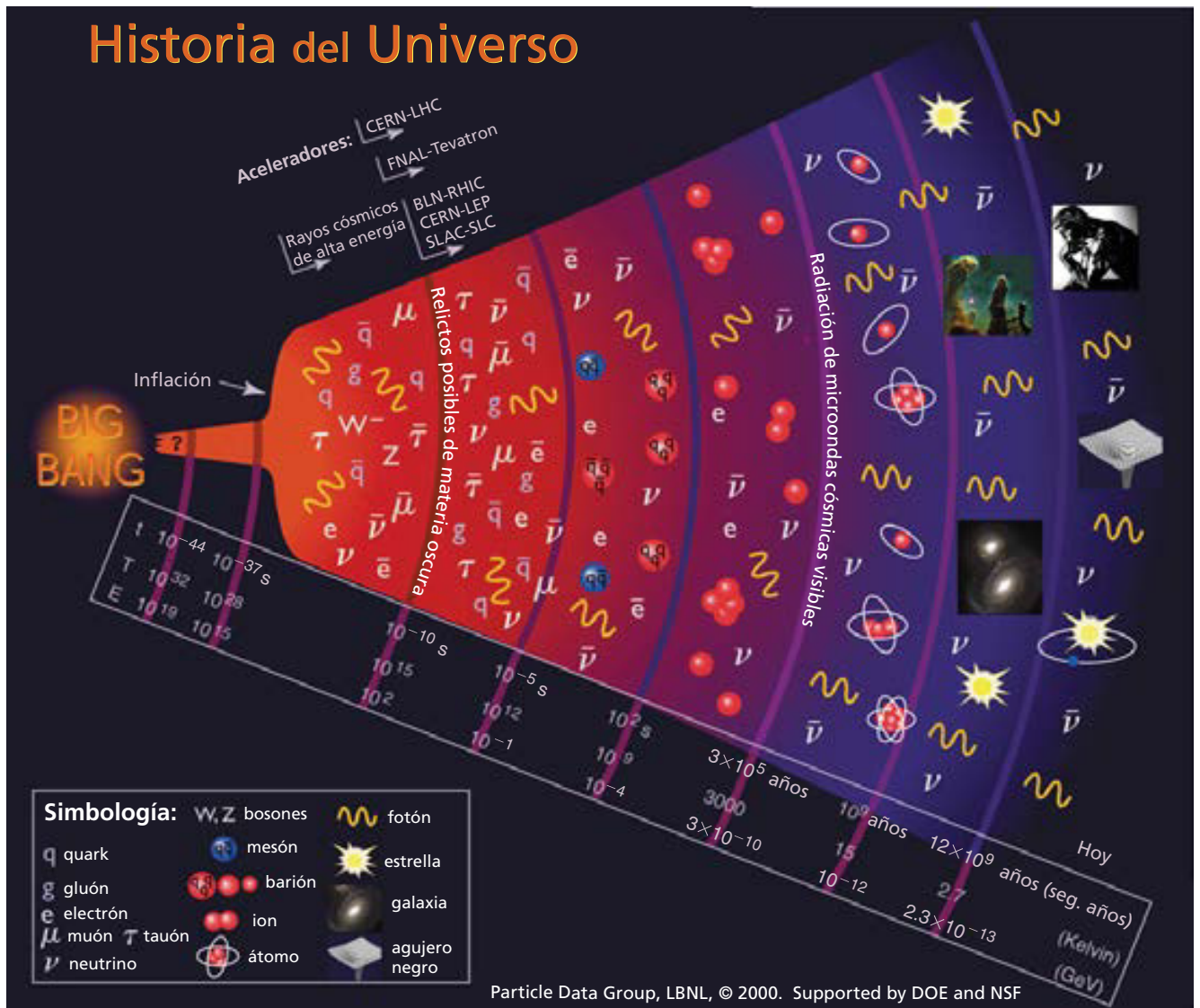
Existe una conexión cósmica entre todas las fuerzas y las partículas que hemos estudiado. La conexión se hace en el modelo del Big Bang (Gran Estallido) de la creación del Universo. La evidencia experimental indica que el Universo tuvo un inicio, y que este inicio implicó densidades y temperaturas tan increíblemente altas que todo era una sopa primordial más allá de la cual es imposible mirar. De acuerdo con este modelo, el Universo explotó en un Big Bang hace 14 000 millones de años.

Los teóricos dividen el desarrollo del Universo en siete etapas (figura 13-3). Inmediatamente después del Big Bang, hasta algo como  $10^{-44}$  segundos, las condiciones eran tan extremas que no existían las leyes de la física tal como las conocemos. Conforme se expandió y se enfrió el Universo, las cuatro fuerzas desarrollaron sus características individuales, y se formaron las partículas que observamos en la actualidad. Los detalles específicos de lo que ocurrió al inicio de este proceso son especulativos, pero se asientan en terreno cada vez más firme conforme transcurre el tiempo.

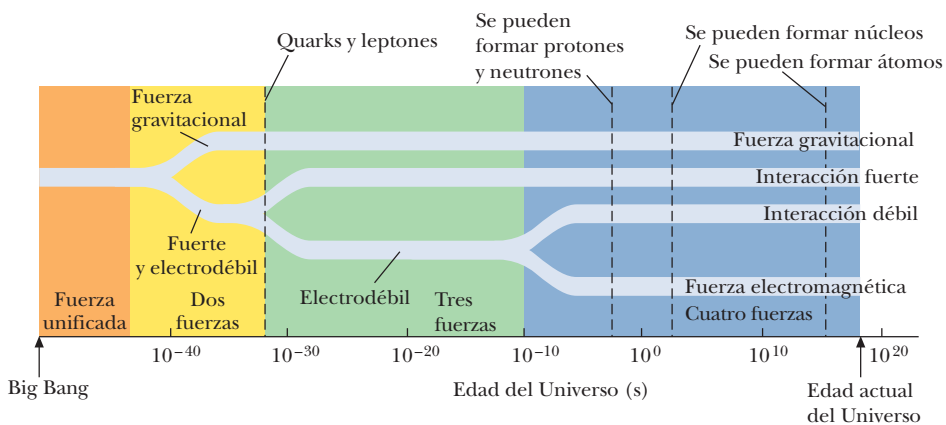
Durante la segunda etapa —entre  $10^{-44}$  y  $10^{-37}$  segundos— la fuerza gravitacional emerge como una fuerza separada, y deja unificadas la fuerza electromagnética y las dos fuerzas nucleares, tal como lo describen las grandes teorías unificadas (figura 13-4). Durante este tiempo, las energías de las partículas y los fotones son tan enormes que existen una creación y una aniquilación continuas de pares masivos de partículas-antipartículas.

Durante la tercera etapa —entre  $10^{-37}$  y  $10^{-10}$  segundos— las temperaturas disminuyen de cerca de  $10^{28}$  K a alrededor de  $10^{15}$  K, y la interacción fuerte se separa de la fuerza electrodébil, lo cual produce tres fuerzas.





**Figura 13-3** La historia del Universo.



**Figura 13-4** Conforme el Universo se expande y se enfría, la fuerza original única se divide en fuerzas nuevas que terminan por convertirse en las cuatro fuerzas que observamos actualmente en la naturaleza.

Cerca del inicio de la cuarta etapa —la cual concluye sólo un microsegundo después del Big Bang— el enfriamiento adicional hace que la fuerza electrodébil se divida en la interacción débil y la interacción electromagnética, lo cual nos da las cuatro fuerzas que ahora detectamos. El Universo está lleno con radiación (fotones), quarks, leptones y sus antipartículas. Las temperaturas son todavía demasiado elevadas para que los quarks se adhieran para formar protones y neutrones.

La quinta etapa ocupa hasta tres minutos después del Big Bang. En ese momento la temperatura había descendido a 1000 millones K, lo cual todavía es mucho más caliente que el interior de nuestro Sol. Al final de esta etapa, los fotones comunes ya no pueden formar pares electrón-positrón, y algunos neutrones y protones han formado núcleos de helio, con cerca de 25% de la masa del Universo como helio y el resto como hidrógeno. Este modelo predice, y las observaciones coinciden, que debe haber un neutrón por cada siete protones. (Debido a la masa adicional del neutrón, es más difícil convertir protones en neutrones que neutrones en protones.)

La sexta etapa concluye cuando la temperatura se reduce a aproximadamente 3000 K, unos 300 000 años después del Big Bang. De repente, la materia se vuelve transparente para los fotones, y éstos pueden viajar por todo el Universo. Este momento define los límites del Universo observable: mirar hacia el espacio es igual que mirar hacia atrás en el tiempo hasta el comienzo. La radiación que observamos de los objetos a una distancia de 1000 millones de años luz quedó ahí hace 1000 millones de años. Por lo tanto, vemos los objetos como estaban en el pasado, no como están en la actualidad.

La etapa final comienza con la formación de los átomos, e incluye la formación de las galaxias, las estrellas y los planetas, como la Tierra.

## Radiación de fondo cósmica

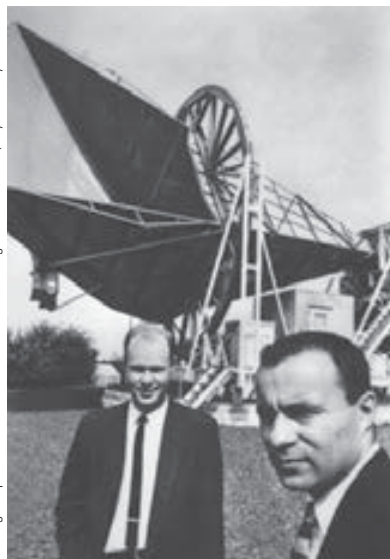
En 1965, los científicos Arno Penzias y Robert Wilson, del Bell Laboratory, hicieron un descubrimiento accidental que tuvo un inmenso impacto en nuestra visión del Universo. Mientras probaban un receptor de microondas sensible (figura 13-5), Penzias y Wilson detectaron un ligero siseo de fondo que causaba problemas a sus comunicaciones por satélite. Intentaron limpiar minuciosamente el receptor después de desalojar a una parvada de pichones, y trataron de enfriar las partes electrónicas. Sin embargo, el fondo persistía. Además, la intensidad del fondo era igual, sin tomar en cuenta la dirección en que apuntara su detector de microondas. Esto sugería que la fuente estaba fuera del Sistema Solar, o incluso fuera de la Galaxia.

Por suerte, Penzias y Wilson se enteraron de que un grupo de científicos en la Princeton University había predicho la existencia de una *radiación de fondo cósmica*. Esta radiación se había emitido en el momento que el Universo se hizo transparente a la radiación visible, alrededor de 300 000 años después del Big Bang. Aunque la radiación tenía una temperatura de 3000 K en esa época, se había enfriado cuando se expandió el Universo y ahora debía aparecer con una temperatura de aproximadamente 3 K.

Penzias y Wilson provocaron bastante agitación en la comunidad científica cuando anunciaron que ya habían detectado la radiación de fondo cósmica. Debido a que su medición estaba en una sola longitud de onda, no podían determinar la temperatura. Sin embargo, las mediciones por parte de otros grupos rápidos demostraron que la radiación tenía una excelente coincidencia con una temperatura de 2.725 K, de acuerdo con lo predicho.

La existencia y las propiedades de la radiación de fondo cósmica son la evidencia experimental de mayor peso que apoya el modelo del Big Bang. Penzias y Wilson recibieron el premio Nobel en 1978 por su descubrimiento.

No obstante, este descubrimiento condujo a un problema nuevo. La temperatura era exactamente igual en todas las direcciones. ¿Cómo podía formarse un Universo lleno de galaxias, estrellas y planetas a partir de algo tan uniforme? Datos más recientes de mediciones de satélite muestran variaciones en la temperatura en el orden de 0.0002 K, lo cual puede ser suficiente para explicar la estructura del Universo.



**Figura 13-5** Arno Penzias (derecha) y Robert Wilson frente a su receptor de microondas.

## Materia oscura y energía oscura

Debía ser uno de los resultados más incómodos de la ciencia moderna: sólo cerca de 5% del Universo está formado por materia *común*; el tipo de materia que forma las estrellas, los planetas, las rocas y las personas.\* Además de permitir la posibilidad de que el espacio se expande, la teoría general de la relatividad de Einstein abrió la puerta a la posibilidad de que la idea de un espacio plano —uno en el cual las líneas paralelas nunca convergen o divergen— pudiera ser una ilusión local. Durante más de 90 años, los científicos han manejado la posibilidad de un espacio curvo. La densidad general de la materia en el Universo determina la forma del espacio (en términos generales, si es cóncavo, plano, o convexo).

Resultados recientes que miden las ondulaciones instantáneas en la radiación de fondo cósmica —la radiación de microondas que es la señal que queda de la época en que el Universo enfriado por primera vez se volvió transparente a su propia radiación— confirman que parece que vivimos en un Universo con exactamente la densidad de materia crítica para formar un espacio plano a escalas cósmicas. Debido a que esto parecería demasiado improbable para que ocurriera de casualidad, los científicos han buscado mecanismos que favorezcan un universo plano. Generalmente se han conformado con un mecanismo llamado *inflación* —un periodo en el cual el Universo creció hasta  $10^{30}$  en apenas  $10^{-36}$  segundos al inicio de su historia— para explicar por qué desarrolló exactamente la densidad crítica para ser plano. El acertijo es que la densidad de toda la materia común que podemos hallar sólo explica cerca de 5% de esta densidad crítica. De modo que, ¿qué es el otro 95%?

El primer indicio importante de que hay algo ahí afuera que no podemos ver proviene de estudios cuidadosos de los movimientos de las estrellas dentro de las galaxias. Una galaxia es un conjunto de miles de millones de estrellas (igual que nuestra galaxia Vía Láctea) en la cual las estrellas individuales orbitan respecto al centro de la galaxia. Por ejemplo, el Sol tarda cerca de 250 millones de años en completar una órbita alrededor de nuestra galaxia. La velocidad a la cual se mueve una estrella respecto a su centro galáctico depende de la distribución de la materia dentro de la galaxia; la atracción gravitacional de la materia mantiene la estrella en su órbita. Al medir la distribución de la materia visible común dentro de una galaxia, es posible predecir qué tan rápido deben moverse las estrellas cerca del exterior. Estas estrellas de manera recurrente se mueven más rápido de lo predicho, lo que indica que debe existir cierta materia invisible dentro de las galaxias. Esta materia libre se ha llamado *materia oscura*.

La primera pregunta que formularon los científicos acerca de la materia oscura es si es simplemente materia común demasiado fría para ser apreciada mediante métodos convencionales —los llamados Objetos astrofísicos masivos de halo compacto (MACHOs, por sus siglas en inglés)— o es alguna forma de materia exótica hecha de algo diferente a nuestros conocidos protones, neutrones y electrones; las llamadas Partículas masivas que interactúan débilmente (WIMPs, por sus siglas en inglés). Sí, era una batalla entre los MACHOs y los WIMPs (cobardes). Aunque los menos exóticos MACHOs, conforman una parte de la materia oscura, casi todos los científicos coinciden en que algún tipo de materia exótica con una forma todavía no identificada necesariamente debe constituir la mayor parte de la materia oscura. Pero esto todavía no basta para llevarnos a la densidad de masa crítica requerida para un Universo plano. Los estimados más recientes son que cerca de 25% de la materia del Universo está en la forma de materia oscura exótica. Pero junto con el 5% de la materia común, esto deja sin explicar un 70%.

Recientemente, científicos que estudiaban supernovas muy distantes —explosiones estelares muy brillantes— descubrieron que las supernovas más distantes en realidad están más atenuadas de lo que se esperaba si la expansión del Universo se frenara a la velocidad esperada debido a la atracción de la gravedad. La explicación para estas supernovas más atenuadas de lo esperado es que la velocidad de expansión del Universo en realidad aumenta; lo cual aleja a las supernovas. Esto implica

\*Ensayo por Jeff Adams, Physics Department, Montana State University.

que debe existir alguna presión a gran escala en el Universo que contrarresta la atracción de la gravedad mutua provocada por las materias común y oscura. Esta fuerza de presión se ha atribuido a una *energía oscura*, la cual debe estar uniformemente distribuida en todo el Universo. Además, la densidad de la energía oscura puede ser exactamente lo que se necesita para compensar el 70% faltante con el que se lograría la densidad crítica para un Universo plano. (Einstein nos dijo que la energía tiene una masa equivalente.) Por ahora, los científicos poco pueden decir acerca de esta energía oscura. Y no obstante, se concentra la evidencia de que la energía oscura puede ser la materia más generalizada en el Universo.

## Neutrinos

Los neutrinos son únicos entre las partículas elementales en que gran parte de lo que sabemos acerca de ellos proviene de fuerzas más allá de nuestro control.\* En los primeros días de la física de los neutrinos, aprendimos mucho de los experimentos con reactores y aceleradores, pero en los últimos años nuestra información más precisa proviene de observar los neutrinos del Sol, los rayos cósmicos y las supernovas solas. Estos resultados se han obtenido con esfuerzo. Los experimentos mismos son prolongados y difíciles; deben efectuarse en minas y túneles alejados de las comodidades y la infraestructura de los grandes laboratorios para escapar de la radiación cósmica que inundaría las diminutas señales de los neutrinos. También ha sido necesario afinar nuestra comprensión teórica de las fuentes en un grado extraordinario, para desentrañar la física fundamental de los neutrinos a partir de los datos.

El comité del premio Nobel 2002 reconoció a dos pioneros en este campo. Ray Davis de la University of Pennsylvania, fue el primero en intentar la detección de los neutrinos solares. Utilizó cientos de toneladas de líquido limpiador colocadas en lo profundo de una mina en Dakota del Sur. El líquido limpiador era una forma económica y segura de cloro, un eficiente absorbente de neutrinos. Sus resultados iniciales, obtenidos a principios de la década de 1970, mostraron la primera señal de que los neutrinos eran más complicados de lo que sugerían los modelos matemáticos. Masatoshi Koshiba inició una serie de experimentos en tanques de agua, en una mina en el norte de Japón, que mostraron señales similares en el flujo de los neutrinos producidos por los rayos cósmicos que chocan contra la atmósfera terrestre. El equipo que reunió continuó preparando la primera medición direccional en tiempo real de los neutrinos solares y observando una pequeña ráfaga de neutrinos de la supernova SN1987A: la primera vez que se observó una radiación no electromagnética de una fuente identificable más allá de nuestro Sistema Solar.

El acertijo desenterrado por Davis, Koshiba y sus colaboradores se convirtió en la inesperadamente baja tasa de neutrinos de electrones provenientes del Sol y una extraña razón de neutrinos de electrones entre neutrinos de muón apreciada en la señales de los rayos cósmicos. Todos los resultados parecen apuntar a una secreta característica de la mecánica cuántica, la cual permitía la posibilidad de que tres tipos de neutrinos (llamados *sabores*) —el electrón, el muón y el tauón— pudieran mutar de uno a otro si sus masas fueran diferentes por una magnitud diminuta. Esta “oscilación de neutrinos” fue propuesta por primera vez en la década de 1960 por el físico italo-soviético Bruno Pontecorvo. Esto en sí mismo era un desafío para la noción predominante de que los neutrinos no tenían masa.

Estas firmes pistas experimentales y datos teóricos de peso exigían acometer con determinación el problema del neutrino. Se diseñaron y se crearon dos tipos de experimentos para obtener datos cruciales de los neutrinos. Se montaron experimentos radioquímicos, similares a los de Davis, pero basados en el galio, bajo los Apeninos y las montañas del Cáucaso. Éstos proporcionaron una primera visión de los neutrinos que surgían directamente de una fusión protón-protón en el Sol. En Canadá, se utilizó un singular suministro de agua pesada para construir el Sudbury Neutrino Observatory (SNO), el cual entró en funcionamiento en 1999. El agua pe-

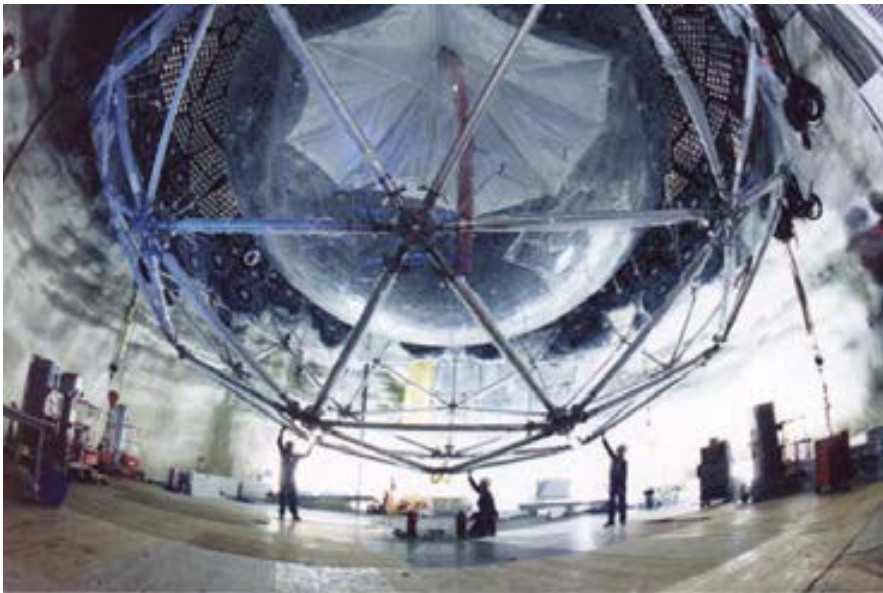


Cortesía de © SNO Institute

Concepción de un artista del detector SNO. El recipiente de acrílico contiene el agua pesada. La estructura contiene los sensores de luz. La cámara completa se inunda con agua común para sostener la cámara de acrílico y evitar problemas de transmisión de luz desde la cámara.

\*Ensayo por Chris Waltham, Department of Physics and Astronomy, University of British Columbia y Sudbury Neutrino Observatory.





El detector del SNO durante su construcción.

Cortesía de © SNO Institute

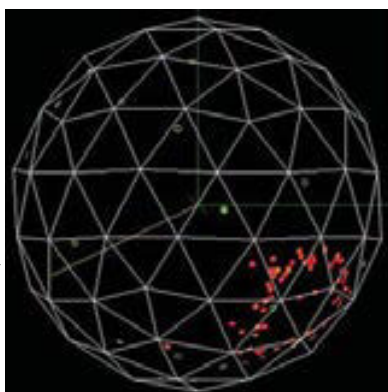
sada nos permitió, por primera vez, desentrañar los sabores de los neutrinos. Además de esta nueva evidencia experimental, los astrofísicos teóricos han afinado los modelos del interior del Sol y de los rayos cósmicos. Las experiencias han sido impresionantes, sobre todo en el caso del Sol; ahora en verdad podemos afirmar que comprendemos con precisión el interior del Sol y su horno termonuclear. Como resultado, las peculiaridades de los neutrinos mismos se han destacado con nitidez.

La imagen que surgió es que el Sol es propulsado por reacciones termonucleares que producen neutrinos de electrones en las cantidades esperadas. Se sospechaba este mecanismo de producción de energía desde la década de 1930, pero ahora tenemos pruebas firmes. Sin embargo, los neutrinos que vemos en la Tierra son sólo 34% a neutrinos de electrones; el otro 66% son de los tipos del muón y el tauón.

Los rayos cósmicos producen neutrinos de muón y de electrón en la atmósfera terrestre, tal como se esperaba, pero cerca de la mitad de los neutrinos de muón llegan a nosotros como neutrinos de tauón.

La mecánica cuántica de Pontecorvo tiene la explicación siguiente. Los neutrinos nacen en distintos sabores —de electrón, de muón y de tauón— pero se propagan como tipos de masas distintos; por ejemplo, 1, 2 y 3. A diferencia de sus contrapartes de electrón, muón y tauón cargados, los sabores y las masas no coinciden. Cada uno es una mezcla distinta y minuciosa de los demás. Debido a que las masas 1, 2 y 3 son ligeramente diferentes, viajan a velocidades distintas y quedan fuera de fase entre sí después de un tiempo. Por lo tanto, un neutrino de electrón producido en una reacción nuclear pronto comenzará a verse un poco “como un muón” o “como un tauón” después de viajar un tiempo. En un vacío, el neutrino 1 parece ser en su mayor parte electrón, con un toque de muón y de tauón; el neutrino 2 es una mezcla más o menos igual de los tres; y el neutrino 3 es aproximadamente partes iguales de muón y de tauón. En el denso núcleo del Sol (y, en menor grado, del núcleo de la Tierra), los efectos de la materia cambian estas mezclas. Un neutrino creado con un sabor de electrón en el Sol se propaga como un neutrino 2 casi puro. Una vez fuera del Sol, este neutrino encuentra por sí mismo una mezcla de los tres sabores, y esto produce la fracción de electrón de 34% que en realidad medimos.

Un examen detallado de los sabores de neutrinos realmente observados nos dice mucho acerca de las diferencias de masa diminuta entre los neutrinos 1, 2 y 3. Los neutrinos 1 y 2 están en el orden de 0.01 electronvolts divididos entre la velocidad de la luz al cuadrado ( $\text{eV}/c^2$ ), mientras que los 2 y 3 están separados en el orden de 0.1  $\text{eV}/c^2$ . Estas diferencias de masas son diminutas; la siguiente partícula



Reconstrucción en computadora de un acontecimiento de neutrinos solares en el SNO. Cuando un neutrino choca contra el agua pesada del detector del SNO, se extiende un tenue cono de luz desde ese punto hacia los sensores de luz del SNO. Los puntos verdes indican cuáles sensores detectaron la luz.

más ligera, el electrón, tiene un grandísimo  $0.5 \text{ millón eV}/c^2$ . En la actualidad no sabemos mucho más acerca de las diferencias de masa de los neutrinos, aparte de sus órdenes de magnitud (se conoce la masa del electrón hasta seis cifras significativas). Además, desconocemos la escala de la masa general, aunque la evidencia reciente de la observación de las ondulaciones en la radiación de fondo en microondas cósmicas sugiere que la suma de las tres masas de neutrinos no puede ser más grande de  $0.7 \text{ eV}/c^2$ . Este resultado de la Wilkinson Microwave Anisotropy Probe en 2003 muestra cómo las propiedades de las unidades de la materia más pequeñas determinan la estructura a escala más grande del Universo.

¿Qué significa todo? En este momento no es evidente. Estamos en una de esas coyunturas en la física fundamental donde un aumento temporal en la complejidad sugiere que está por aparecer una comprensión más profunda. Se diseñaron muchos experimentos nuevos para los laboratorios subterráneos en Canadá, Estados Unidos, Japón y Europa, con el fin de mejorar las mediciones. Mientras tanto, los teóricos se esfuerzan por comprender los mecanismos fundamentales de la generación de masas, lo cual da pie a estos resultados aparentemente extraños.

No debemos olvidar las supernovas, las cuales todavía son un poco misteriosas. Los mejores cálculos en las computadoras más rápidas todavía no pueden producir un estallido realista. Sin embargo, está claro que las supernovas verdaderas no pueden estallar sin neutrinos. Necesitamos más datos, y los receptores de neutrinos en el mundo están preparados para la siguiente ráfaga de neutrinos de supernovas, cuando ocurra.

## Los quarks, el Universo y el amor

¿Cómo la física ofrece respuestas a las preguntas acerca del funcionamiento del mundo o, en términos más amplios, del Universo?\* Albert Einstein, la Persona del siglo XX de la revista *Time*, expresó perplejidad y esperanza cuando escribió: “Lo más incomprensible del Universo es que es comprensible.” Es posible interpretar el comentario de Einstein al decir que no podemos comprender por qué el Universo es como es, pero a pesar de eso, parece que podemos describir el Universo en términos de las leyes físicas que se aplican no sólo en la Tierra, sino en cualquier parte del Universo.

¿Cómo podemos describir el Universo con leyes físicas descubiertas por científicos en la Tierra? Richard Feynman, tal vez el más admirado e influyente físico en la segunda mitad del siglo XX, nos dio muchas pistas. Una de sus más memorables revelaciones fue expresar que el hallazgo más importante de la ciencia es que todo está hecho de átomos. Una vez que todo se considera como hecho de átomos, es posible deducir que la comprensión de las leyes que gobiernan el comportamiento de los átomos individuales y sus constituyentes, entre ellos los quarks, lleva, con el esfuerzo suficiente, a comprender los sistemas complejos que contienen inmensas cantidades de átomos. Esto se conoce como la *visión reduccionista*. Supone que cualquier sistema físico, sin importar su complejidad, puede comprenderse en términos de sus partes componentes.

El estudio del origen y destino del Universo se llama cosmología. Con las leyes de la física, podemos reconstruir la historia del Universo, la cual comenzó hace 14 000 millones de años con el Big Bang. Un histograma del Universo (figura 13-3) muestra que antes que el Universo tuviera algunas millonésimas de segundo de vida, era una mezcla increíblemente densa y caliente de materia y antimateria en forma de partículas elementales, entre ellas quarks y antiquarks. Conforme transcurrió el tiempo, el Universo se expandió y enfrió. Cuando el Universo tenía unos 3 minutos de vida, los quarks se habían combinado para formar protones y neutrones, los antiquarks se habían combinado para formar antiprotones y antineutrones, los quarks se habían combinado con los antiquarks para formar los mesones, y los protones, y los neutrones se habían combinado para formar los elementos. Conforme continuó el proceso de enfriamiento, se formaron átomos cuando los

\*Ensayo por Robert S. Panvini, Department of Physics, Vanderbilt University.

electrones se unieron a los núcleos atómicos. La fuerza de la gravedad desempeñó una función dominante cuando el Universo se acercó a 1000 millones de años de antigüedad. La gravedad atrajo los átomos entre sí y formó estrellas y grupos de estrellas. A su vez, estrellas se convirtieron en fuentes de energía cuando los átomos fueron atraídos al interior por la enorme fuerza gravitacional de las estrellas. Cuando los núcleos chocaron en el centro de las estrellas, se sometieron a una fusión nuclear y liberaron energía en forma de radiación electromagnética que vemos como luz solar. Los planetas se formaron de grupos más pequeños de átomos, muy pocos para tener suficiente atracción gravitacional para iniciar la fusión nuclear que caracteriza una estrella.

Lo más sorprendente en la historia del Universo, cuando menos desde nuestra perspectiva, ocurrió cuando se formó un planeta especial: la Tierra. Algún día descubriremos otros planetas como la Tierra, pero lo que es especial de la Tierra es que algunos de los átomos se reunieron para formar moléculas y combinaciones de moléculas muy complejas, y bastantes de estas moléculas complejas, junto con otras moléculas menos complejas, formaron criaturas vivientes, entre ellas perros, gatos, peces, mosquitos, lagartos y personas.

Recuerde cómo llegamos a este punto. Hace 14 000 millones de años todo estaba en forma de partículas elementales. Los quarks del núcleo de un átomo eran parte de la sopa primordial, lo mismo que los electrones que al final se combinaron con los núcleos para formar átomos. Los átomos se reunieron para formar estrellas y planetas, y entonces, cuando menos en un planeta especial, los átomos se pusieron imaginativos y se formó la vida.

Concluimos este ensayo con preguntas, no respuestas. Si los átomos están formados principalmente por quarks (y electrones) y si todo está hecho de átomos, entre ellos las personas, ¿qué es lo que causa números muy grandes de quarks, en la forma de átomos, para exhibir las propiedades complejas de los seres vivos? La característica de los seres humanos que parece más diferente de la materia inanimada incluye la conciencia y la percepción de emociones, entre ellas el amor. Tal vez la visión reduccionista no se aplica a los sistemas tan complejos como las criaturas vivas. Y si no lo hace, ¿por qué no lo hace? Cualquiera que sea la respuesta definitiva, será fascinante descubrirla.

## La búsqueda continúa

En el capítulo 1, nos dimos a la tarea de ampliar su visión del mundo. Comenzamos con una visión del mundo del sentido común y agregamos con cuidado elementos a la visión del mundo de la física. Es imposible que sepamos cuáles pedazos se han vuelto parte de su propia visión del mundo. La experiencia nos ha demostrado que la expansión de una visión del mundo permite a una persona ver conexiones nuevas entre los acontecimientos. Algunas “ven” ondas de sonido, otras sienten la atracción de la gravedad de una manera novedosa, y unas más hablan de experimentar una nueva belleza en un arcoíris o una puesta de Sol.

Esta expansión de la visión del mundo produce diferentes tipos de asombro en personas distintas. Algunos examinamos los fenómenos individuales y nos maravillamos de las conexiones que pueden hacerse entre cosas aparentemente no relacionadas. A otros nos ofrece la posibilidad de comprender el Universo.

Esperamos que haya adquirido cierta percepción de los modos en que evoluciona la visión del mundo de la física. Por ejemplo, esperamos que sepa que no hay una visión del mundo de la física única y estática. Más bien, un núcleo central de componentes relativamente estables está rodeado por una frontera muy fluida e imperceptible. De manera metafórica, es un organismo con ráfagas de crecimiento y regiones de maduración, descomposición, muerte, e incluso renacimiento.

Una parte de nuestro propósito fue mostrarle que este crecimiento avanza dentro de restricciones muy definidas; ciertamente no todo se vale. Aunque los sentimientos intuitivos motivan trayectorias nuevas, suele conducir a callejones sin salida. En esta obra mencionamos muchos callejones sin salida. Elegimos algunas ideas novedosas y descartamos algunas anteriores. Pero dentro del espacio de este libro, no pudimos seguir las numerosas trayectorias a ciegas que ocurrieron

en la construcción de la actual visión del mundo de la física. En su mayor parte, tuvimos que seguir las rutas principales.

No obstante, incluso las rutas principales demuestran por qué los científicos creen en lo que creen. Cuando se viaja desde los movimientos aristotélicos hasta las invenciones de conceptos, como la gravedad y la fuerza de Newton, es tentador mirar con regocijo las ideas más primitivas. Tal vez haya sentido esto. Esta superioridad debe haberse desvanecido rápido conforme adoptamos las ideas del espacio-tiempo de Einstein y la dualidad onda-partícula del mundo submicroscópico. Todas estas nociones son creaciones de la mente humana. Nuestra tarea en la creación de una visión del mundo es crear, pero crear en la manera diferente de un artista o un poeta.

Las creaciones son diferentes porque tenemos una respuesta distinta a la pregunta de por qué creemos en lo que creemos. Nuestras ideas deben coincidir con los resultados de la naturaleza. Para que una idea nueva reemplace a una anterior, debe hacer lo mismo que la anterior y más. Las ideas antiguas fracasan porque los experimentos producen resultados que no coinciden con estas ideas. Las ideas nuevas deben enfrentar el desafío: deben explicar las observaciones que están de acuerdo con la teoría antigua y también abarcar los datos anómalos. La idea de Einstein de un espacio-tiempo torcido incluye los conceptos de la gravedad de Newton, pero hace mucho más.

Las personas pueden afirmar que una idea específica es mucha faramalla. Por ejemplo, pueden decir que la velocidad de la luz no es el límite máximo de velocidad en el Universo. Para que estos críticos hagan una contribución, necesitarán determinar maneras de comprobar sus ideas. Sus teorías deben ser capaces de efectuar predicciones que puedan comprobarse mediante experimentos.

Por eso, la ciencia tiene una interesante personalidad dividida. Durante el nacimiento de una idea, su personalidad depende mucho del sentimiento personal intuitivo de los científicos. Pero la ciencia también tiene un estilo firme, frío y muy impersonal para descartar sin piedad las ideas que han fracasado. Ninguna idea escapa a esta amenaza de abandono. Ninguna idea única es tan atractiva que pueda evitar las pruebas de la naturaleza.

Es muy sugerente pensar que pueden existir máquinas de movimiento perpetuo que pueden resolver nuestra crisis energética, que las posiciones visuales de los objetos celestes revelan el futuro, o que alguna poción mágica puede liberarnos de la entropía de la edad antigua. Estas ideas atraen a casi todas las personas. Sin embargo, el atractivo de una idea no es el único criterio para su inclusión en la visión del mundo de la física.

Ahora llegamos a nuestra idea final: la búsqueda continúa y la visión del mundo evoluciona sin cesar. Sin embargo, es prácticamente imposible predecir la ubicación de las ráfagas de crecimiento futuras. Una encuesta entre físicos produciría diversas posibilidades. Las diferencias dependen del área de conocimientos de quien responda y, tal vez, de algunas ideas más apreciadas.

Y, de ese modo, la búsqueda continúa.

## Capítulo 13



### Revisión

La evidencia experimental más reciente indica que la tasa de expansión del Universo en realidad puede estar aumentando y, por lo tanto, se seguirá expandiendo para siempre. Ésta y otra evidencia experimental ha llevado a la idea de que el Universo está lleno de una “energía oscura” que provoca el aumento en la tasa de expansión.



## PREGUNTAS CONCEPTUALES

1. ¿Cuáles son tres fuentes posibles de ondas gravitacionales?
2. ¿Por qué son tan difíciles de detectar las ondas gravitacionales?
3. El modelo de Bohr no pudo explicar la estabilidad de los átomos. Los electrones orbitantes clásicos acelerarían constantemente, irradiarían constantemente energía en forma de ondas electromagnéticas y avanzarían en espirales hacia el núcleo. Si los planetas orbitantes irradian constantemente energía en forma de ondas gravitacionales, ¿por qué los planetas no avanzan en espiral hacia el Sol?
4. El modelo de Planck explica la estabilidad de los átomos al afirmar que irradian sólo cuando un electrón salta de una órbita permitida a otra. ¿Los planetas irradian ondas gravitacionales continuamente o sólo cuando cambian de órbitas? Explique.
5. ¿Cuál evidencia indirecta se ha encontrado para apoyar la existencia de las ondas gravitacionales?
6. Las estrellas de neutrones tienen un poco más de masa que nuestro Sol. ¿Por qué un sistema binario de estrellas de neutrones debe ser una fuente intensa de ondas gravitacionales?
7. Si el tiempo de vida predicho para el protón excede por mucho la edad actual del Universo, ¿es ingenuo diseñar un experimento para observar la desintegración del protón? Explique.
8. Las teorías actuales predicen que el tiempo de vida del protón excede por mucho la edad actual del Universo. ¿Esto significa que un protón nunca se ha desintegrado? Explique.
9. ¿Cuál de las fuerzas fundamentales de la naturaleza no está incluida en las grandes teorías de la unificación?
10. ¿Qué intenta hacer la teoría de la supercadena que otras grandes teorías unificadas no hacen?
11. ¿Cuáles son los bloques de construcción fundamentales de la materia y la fuerza en las teorías de las supercadenas actuales?
12. ¿Qué tan grandes son los bloques de construcción fundamentales en las teorías de las supercadenas actuales?
13. ¿Qué edad tiene el Universo?
14. Hubo un periodo justo después del Big Bang en el que no existían las leyes de la física tal como las conocemos y no era necesario tomar clases de física universitaria. ¿Cuánto tiempo duró este periodo?
15. ¿Cuál de las fuerzas fundamentales fue la primera en distinguirse de las otras después del Big Bang?
16. ¿Cuánto tiempo se requirió después del Big Bang para que las cuatro fuerzas fundamentales de la naturaleza se distinguieran entre sí? ¿Puede parpadear a esa velocidad?
17. ¿Por qué los experimentos con neutrinos deben efectuarse en minas en lo profundo bajo la superficie terrestre?
18. Las reacciones de fusión en el Sol ahora se comprenden bien. Estas reacciones predicen una proporción mucho más alta de neutrinos de electrón comparada con los otros dos sabores observados aquí en la Tierra. ¿Cómo explican los científicos esta discrepancia?
19. ¿Cuál evidencia llevó a los científicos a creer que el Universo es “plano”?
20. ¿Cuál observación llevó a los científicos a concluir que aumenta la tasa de expansión del Universo?
21. Describa la visión del mundo reduccionista en sus propias palabras.
22. Un amigo afirma, “Mi tío Fred escribió un libro que explica todo. En su teoría, las estrellas fugaces son ángeles que viajan más rápido que la luz, y los dinosaurios fueron exterminados en la Gran Inundación. No sé por qué Einstein es más famoso que mi tío. Después de todo, la relatividad es *sólo una teoría*”. ¿Debe Einstein ser más famoso que el tío Fred? Explique.



# Apéndice

## Laureados Nobel en física

Los premios Nobel se conceden por voluntad de Alfred Nobel (1833-1896), el químico e ingeniero sueco que inventó la dinamita y otros explosivos. La distribución anual del premio comenzó el 10 de diciembre de 1901, el aniversario de la muerte de Nobel. No se entregaron premios Nobel en 1916, 1931, 1934, 1940, 1941, ni 1942. Puede saber más sobre los premios Nobel en todas las categorías en el archivo en Internet de los premios Nobel, <http://nobelprizes.com>.

- |      |  |      |   |
|------|--|------|---|
| 1901 | <b>Wilhelm Roentgen*</b> (Alemania), por el descubrimiento de los rayos X.   | 1917 | <b>Charles Barkla</b> (Gran Bretaña), por el descubrimiento de los rayos X característicos de los elementos.  |
| 1902 | <b>Hendrik Lorentz</b> y <b>Pieter Zeeman</b> (ambos de Holanda), por la investigación de la influencia del magnetismo en la radiación.                            | 1918 | <b>Max Planck*</b> (Alemania), por el descubrimiento de la teoría cuántica de la energía.   |
| 1903 | <b>Henri Becquerel*</b> (Francia), por el descubrimiento de la radiactividad, y <b>Pierre</b> y <b>Marie Curie†</b> (Francia), por el estudio de la radiactividad. | 1919 | <b>Johannes Stark</b> (Alemania), por el descubrimiento del efecto Doppler en los rayos en canales y la división de las líneas espectrales mediante campos eléctricos.  |
| 1904 | <b>Lord Rayleigh</b> (Gran Bretaña), por el descubrimiento del argón.  | 1920 | <b>Charles Guillaume</b> (Suiza), por el descubrimiento de las anomalías en las aleaciones níquel-acero.  |
| 1905 | <b>Philipp Lenard</b> (Alemania), por la investigación sobre los rayos catódicos.  | 1921 | <b>Albert Einstein*</b> (Alemania), por la explicación del efecto fotoeléctrico.  |
| 1906 | <b>Sir Joseph Thomson</b> (Gran Bretaña), por la investigación sobre la conductividad eléctrica de los gases.  | 1922 | <b>Niels Bohr*</b> (Dinamarca), por la investigación de la estructura atómica y la radiación.   |
| 1907 | <b>Albert A. Michelson</b> (EUA), por investigaciones espectroscópicas y metrológicas.   | 1923 | <b>Robert A. Millikan</b> (EUA), por el trabajo sobre la carga eléctrica elemental y el efecto fotoeléctrico.   |
| 1908 | <b>Gabriel Lippmann</b> (Francia), por la reproducción fotográfica de los colores.   | 1924 | <b>Karl Siegbahn</b> (Suecia), por las investigaciones en la espectroscopia de los rayos X.   |
| 1909 | <b>Guglielmo Marconi</b> (Italia) y <b>Karl Braun</b> (Alemania), por el descubrimiento de la telegrafía inalámbrica.  | 1925 | <b>James Franck</b> y <b>Gustav Hertz</b> (ambos de Alemania), por el descubrimiento de las leyes que controlan el impacto de los electrones sobre los átomos.  |
| 1910 | <b>Johannes van der Waals</b> (Holanda), por la investigación relacionada con la ecuación del estado de los gases y los líquidos.                                  | 1926 | <b>Jean B. Perrin</b> (Francia), por el trabajo sobre la estructura discontinua de la materia y el descubrimiento del equilibrio en la sedimentación.   |
| 1911 | <b>Wilhelm Wien</b> (Alemania), por las leyes que controlan la irradiación de calor.   | 1927 | <b>Arthur H. Compton</b> (EUA), por el descubrimiento del efecto Compton, y <b>Charles Wilson</b> (Gran Bretaña), por un método para volver visibles las trayectorias de las partículas con carga eléctrica mediante la condensación de vapor (cámara de niebla). |
| 1912 | <b>Gustaf Dalén</b> (Suecia), por la invención de los reguladores automáticos utilizados en los faros marítimos y las boyas luminosas.                             | 1928 | <b>Sir Owen Richardson</b> (Gran Bretaña), por el descubrimiento de la ley de Richardson de la emisión termiónica.  |
| 1913 | <b>Heike Kamerlingh Onnes*</b> (Holanda), por investigaciones de las propiedades de la materia a bajas temperaturas y la producción de helio líquido.              | 1929 | <b>Príncipe Louis de Broglie</b> (Francia), por el descubrimiento de la naturaleza ondulatoria de los electrones.   |
| 1914 | <b>Max von Laue</b> (Alemania), por el descubrimiento de la difracción de los rayos X mediante cristales.  | 1930 | <b>Sir Chandrasekhara Raman</b> (India), por el trabajo sobre la difusión de la luz y el descubrimiento del efecto Raman.   |
| 1915 | <b>Sir William Bragg</b> y <b>Sir Lawrence Bragg</b> (ambos de Gran Bretaña), por el análisis de la estructura de los cristales mediante rayos X.                  | 1931 | No se entregó el premio.  |
| 1916 | No se entregó el premio.   | 1932 | <b>Werner Heisenberg</b> (Alemania), por el descubrimiento de la mecánica cuántica.   |
|      |  | 1933 | <b>Erwin Schrödinger</b> (Austria) y <b>Paul A. M. Dirac</b> (Gran Bretaña), por el descubrimiento de formas nuevas de la teoría atómica.   |

\*Estos ganadores se mencionan en el texto.

†Marie Curie también recibió un premio Nobel en química en 1911.

- 1934 No se entregó el premio.
- 1935 **Sir James Chadwick** (Gran Bretaña), por el descubrimiento del neutrón.
- 1936 **Victor Hess** (Austria), por el descubrimiento de la radiación cósmica, y **Carl D. Anderson** (EUA), por el descubrimiento del positrón.
- 1937 **Clinton J. Davission** (EUA) y **Sir George P. Thomson** (Gran Bretaña), por el descubrimiento de la difracción de los electrones mediante cristales.
- 1938 **Enrico Fermi** (Italia), por la identificación de elementos radiactivos nuevos y el descubrimiento de las reacciones nucleares efectuadas por los neutrones lentos.
- 1939 **Ernest Lawrence** (EUA), por el descubrimiento del ciclotrón.
- 1940-1942 No se entregaron premios.
- 1943 **Otto Stern** (EUA), por el descubrimiento del momento magnético del protón.
- 1944 **Isidor I. Rabi** (EUA), por el trabajo sobre la resonancia magnética nuclear.
- 1945 **Wolfgang Pauli** (Austria), por el descubrimiento del principio de exclusión de Pauli.
- 1946 **Percy Bridgman** (EUA), por los estudios y los inventos en la física de alta presión.
- 1947 **Sir Edward Appleton** (Gran Bretaña), por el descubrimiento de la capa de Appleton en la ionosfera.
- 1948 **Lord Patrick Blackett** (Gran Bretaña), por descubrimientos en física nuclear y radiación cósmica con una cámara de vapor de Wilson mejorada.
- 1949 **Hideki Yukawa** (Japón), por la predicción de la existencia de los mesones.
- 1950 **Cecil Powell** (Gran Bretaña), por el método fotográfico para estudiar los procesos nucleares y descubrimientos acerca de los mesones.
- 1951 **Sir John Cockroft** (Gran Bretaña) y **Ernest Walton** (Irlanda), por el trabajo sobre la transmutación de los núcleos atómicos.
- 1952 **Edward Purcell** y **Felix Bloch** (ambos de EUA), por el descubrimiento de la resonancia magnética nuclear en los sólidos.
- 1953 **Frits Zernike** (Holanda), por el descubrimiento del microscopio de contraste de fases.
- 1954 **Max Born** (Gran Bretaña), por el trabajo en la mecánica cuántica, y **Walter Bothe** (Alemania), por el trabajo en la radiación cósmica.
- 1955 **Polykarp Kusch** (EUA), por la medición del momento magnético del electrón, y **Willis E. Lamb, Jr.** (EUA), por descubrimientos relacionados con el espectro del hidrógeno.
- 1956 **William Shockley**, **Walter Brattain** y **John Bardeen** (todos de EUA), por el descubrimiento del transistor.
- 1957 **Tsung-Dao Lee** y **Chen Ning Yang** (ambos de China), por descubrir violaciones del principio de paridad.
- 1958 **Pavel Cerénkov**, **Ilya Frank** e **Igor Tamm** (todos de la ex U.R.S.S.), por el descubrimiento y la interpretación del efecto Cerénkov.
- 1959 **Emilio Segrè** y **Owen Chamberlain** (ambos de EUA), por la confirmación de la existencia del antiprotón.
- 1960 **Donald Glaser** (EUA), por la invención de la cámara de burbujas.
- 1961 **Robert Hofstadter** (EUA), por la determinación del tamaño y la forma de los núcleos, y **Rudolf Mössbauer** (Alemania), por el descubrimiento del efecto Mössbauer de la absorción de los rayos gamma.
- 1962 **Lev D. Landau** (U.R.S.S.), por las teorías sobre la materia condensada (superfluidez en el helio líquido).
- 1963 **Eugene Wigner**, **Maria Goeppert-Mayer** (ambos de EUA), y **J. Hans D. Jensen\*** (Alemania), por la investigación sobre la estructura de los núcleos.
- 1964 **Charles Townes** (EUA), **Nikolai Basov** y **Alexandr Prokhorov** (ambos de la U.R.S.S.), por el trabajo en la electrónica cuántica que condujo a la construcción de instrumentos basados en los principios de los máser-láser.
- 1965 **Richard Feynman\***, **Julian Schwinger** (ambos de EUA) y **Shinichiro Tomonaga** (Japón), por la investigación en electrodinámica cuántica.
- 1966 **Alfred Kastler** (Francia), por el trabajo sobre los niveles de la energía atómica.
- 1967 **Hans Bethe** (EUA), por el trabajo sobre la producción de energía de las estrellas.
- 1968 **Luis Alvarez** (EUA), por el estudio de las partículas subatómicas.
- 1969 **Murray Gell-Mann** (EUA), por el estudio de las partículas subatómicas.
- 1970 **Hannes Alfvén** (Suecia), por las teorías en la física del plasma, y **Louis Néel** (Francia), por descubrimientos en antiferromagnetismo y ferromagnetismo.
- 1971 **Dennis Gabor** (Gran Bretaña), por la invención del holograma.
- 1972 **John Bardeen\***, **Leon Cooper\*** y **John Schrieffer\*** (todos de EUA), por la teoría de la superconductividad.
- 1973 **Ivar Giaever** (EUA), **Leo Esaki** (Japón) y **Brian Josephson** (Gran Bretaña), por las teorías y los avances en el campo de la electrónica.
- 1974 **Anthony Hewish** (Gran Bretaña), por el descubrimiento de los pulsares, y **Martin Ryle** (Gran Bretaña), por las sondas de radiotelescopio del espacio exterior.
- 1975 **James Rainwater** (EUA), **Ben Mottelson**, y **Aage Bohr** (ambos de Dinamarca), por el descubrimiento de la teoría de la estructura de los núcleos.
- 1976 **Burton Richter** y **Samuel Ting** (ambos de EUA), por el descubrimiento de las partículas  $J/\psi$  subatómicas.
- 1977 **Philip Anderson**, **John Van Vleck** (ambos de EUA) y **Nevill Mott** (Gran Bretaña), por el trabajo implícito en las memorias de las computadoras y los dispositivos electrónicos.
- 1978 **Arno Penzias\*** y **Robert Wilson\*** (ambos de EUA), por el descubrimiento de la radiación de fondo de las microondas cósmicas, y **Pyotr Kapitsa** (U.R.S.S.), por la investigación en física de la temperatura baja.
- 1979 **Steven Weinberg\***, **Sheldon Glashow\*** (ambos de EUA) y **Abdus Salam\*** (Pakistán), por el desarrollo de la teoría de que la fuerza electromagnética y la interacción débil son facetas del mismo fenómeno.
- 1980 **James Cronin** y **Val Fitch** (ambos de EUA), por el trabajo relacionado con la asimetría de las partículas subatómicas.
- 1981 **Nicolaas Bloembergen** y **Arthur Schawlow** (ambos de EUA), por las contribuciones para el descubrimiento de la espectroscopia láser, y **Kai Siegbahn** (Suecia), por las contribuciones para el descubrimiento de la espectroscopia de electrones de alta resolución.
- 1982 **Kenneth Wilson** (EUA), por el estudio de las transiciones de fase en la materia.
- 1983 **Subramanyan Chandrasekhar** (EUA), por los estudios teóricos de los procesos importantes en la evolución de las estrellas, y **William Fowler** (EUA), por los estudios de la formación de los elementos químicos en el Universo.
- 1984 **Carlo Rubbia** (Italia) y **Simon van der Meer** (Holanda), por el trabajo en el descubrimiento de los bosones vectoriales intermedios.



- 1985 **Klaus von Klitzing** (Alemania), por el descubrimiento del efecto Hall cuantizado.
- 1986 **Ernst Ruska** (Alemania), por el diseño del microscopio de electrones, y **Gerd Binnig** (Alemania) y **Heinrich Rohrer** (Suiza), por el diseño del microscopio de túnel de exploración.
- 1987 **K. Alex Müller** (Suiza) y **J. Georg Bednorz** (Alemania), por descubrimiento de un material superconductor de “alta temperatura”.
- 1988 **Leon Lederman, Melvin Schwartz y Jack Steinberger** (todos de EUA), por el descubrimiento de un nuevo instrumento para estudiar la fuerza nuclear débil y el descubrimiento del neutrino del muón.
- 1989 **Norman Ramsay** (EUA), por diversas técnicas en la física atómica, y **Hans Dehmelt** (EUA) y **Wolfgang Paul** (Alemania), por el descubrimiento de técnicas para atrapar partículas cargadas solas.
- 1990 **Jerome Friedman, Henry Kendall** (ambos de EUA), y **Richard Taylor** (Canadá), por los experimentos importantes para el descubrimiento del modelo del quark.
- 1991 **Pierre de Gennes** (Francia), por descubrir métodos para estudiar los fenómenos de orden en las formas de la materia compleja.
- 1992 **Georges Charpak** (Francia), por la invención y el descubrimiento de los detectores de partículas.
- 1993 **Russell Hulse\*** y **Joseph Taylor\*** (ambos de EUA), por descubrir evidencia de las ondas gravitatorias.
- 1994 **Bertram Brockhouse** (Canadá) y **Clifford Shull** (EUA), por contribuciones pioneras para el descubrimiento de las técnicas de dispersión de neutrones para los estudios de la materia condensada.
- 1995 **Martin Perl** y **Frederick Reines** (ambos de EUA), por contribuciones pioneras experimentales para la física de los leptones.
- 1996 **David Lee, Douglas Osheroff y Robert Richardson** (todos de EUA), por su descubrimiento de la superfluidez en el helio 3.
- 1997 **Steven Chu** (EUA), **Claude Cohen-Tannoudji** (Argelia) y **William Phillips** (EUA), por el descubrimiento de métodos para enfriar y atrapar átomos con una luz láser.
- 1998 **Robert Laughlin** (EUA), **Horst Stormer** (Alemania) y **Daniel Tsui** (China), por su descubrimiento de una nueva forma de fluido cuántico con excitaciones fraccionalmente cargadas.
- 1999 **Gerardus 't Hooft y Martinus Veltman** (ambos de Holanda), por dilucidar la estructura cuántica de las interacciones electrodébiles.
- 2000 **Zhores I. Alferov** (Rusia) y **Herbert Kroemer** (EUA), por desarrollar las heteroestructuras semiconductoras utilizadas en la electrónica de alta velocidad y la optoelectrónica, y **Jack St. Clair Kilby** (EUA), por su participación en la invención del circuito integrado.
- 2001 **Eric A. Cornell, Wolfgang Ketterle y Carl E. Wieman** (todos de EUA), por el logro de la condensación de Bose-Einstein en gases diluidos de átomos alcalinos y por los estudios fundamentales iniciales de las propiedades de los condensados.
- 2002 **Raymond Davis, Jr.,\* Riccardo Giacconi** (ambos de EUA), y **Masatoshi Koshiba\*** (Japón), por contribuciones pioneras para la astrofísica.
- 2003 **Alexei A. Abrikosov, Vitali L. Ginzburg** (ambos de Rusia), y **Anthony J. Leggett** (Gran Bretaña y EUA), por contribuciones pioneras para la teoría de los superconductores y los superfluidos.
- 2004 **David J. Gross, H. David Politzer y Frank Wilczek** (todos de EUA), por el descubrimiento de la libertad asintótica en la teoría de la interacción fuerte.
- 2005 **Roy J. Glauber** (EUA), por las contribuciones a la teoría cuántica de la coherencia óptica, y **John L. Hall** (EUA) y **Theodor-W. Hänsch** (Alemania), por las contribuciones para el descubrimiento de la espectroscopia de precisión basada en un láser.
- 2006 **John C. Mather y George C. Smoot** (ambos de EUA), por el descubrimiento de la forma del cuerpo negro y la anisotropía de la radiación de fondo de las microondas cósmicas.
- 2007 **Albert Fert** (Francia) y **Peter Grünberg** (Alemania), por el descubrimiento de la magnetorresistencia gigante.
- 2008 **Yoichiro Nambu** (EUA) por el descubrimiento del mecanismo de la simetría interrumpida espontánea en la física subatómica, y **Makoto Kobayashi y Toshihide Maskawa** (ambos de Japón) por el descubrimiento del origen de la simetría interrumpida que predice la existencia de al menos tres familias de quarks en la naturaleza.
- 2009 **Charles K. Kao** (China) por los logros innovadores relacionados con la transmisión de la luz en las fibras para la comunicación óptica, y **Willard S. Boyle** (Canadá) y **George E. Smith** (EUA) por la invención de un circuito semiconductor de imágenes.



# Respuestas

a casi todas las preguntas y ejercicios con números impares

## Capítulo 1

### Preguntas


- Una visión del mundo de la física incorpora datos fuera del alcance de las sensaciones humanas.
- No tiene ninguna base científica.
- Debe: (a) explicar los datos conocidos, (b) hacer predicciones comprobables, y (c) tener una base científica.
- Entre más prestigiado sea el científico que propone la teoría, más probable es que la comunidad científica asigne recursos para probarla.
- Estados Unidos.
- Alrededor de 170 cm.
- Cerca de 2.5 m.
- Aproximadamente 85 kg.
- Centinela (centi-nela).
- $10^{10}$  personas (6500 millones de personas).

### Ejercicios

- 86 400 s.
- 109 yd.
- 39.4 pulg.
- (a)  $6.82 \times 10^4$  m, (b)  $4.56 \times 10^{-10}$  g.
- (a) 3480 s, (b) 0.000 0111 kg.
- (a)  $6.21 \times 10^1$ , (b)  $3.2 \times 10^9$ .
- $10^4$  veces.

## Capítulo 2

### Preguntas

- El disco acelera y después frena.
- A la mitad.
- 
- El automóvil.
- Menos de 45 mph.
- Tenían la misma rapidez promedio, pero Chris tenía valores de la rapidez instantánea más altos.
- La rapidez promedio es mayor que la rapidez instantánea en C y menor que la rapidez instantánea en D.
- Determina el tiempo requerido para viajar entre los marcadores de los kilómetros (o las millas).
- No, la rapidez promedio no nos indica ninguna rapidez instantánea.
- Un cronómetro y un odómetro proporcionan la rapidez promedio; un velocímetro ofrece la rapidez instantánea.

- La velocidad tiene una dirección.
- Ambos tienen una aceleración de cero.
- Cualquier cosa que modifica la rapidez (o la dirección) es un acelerador.
- La bicicleta tiene la aceleración más alta.
- La motocicleta.
- Carlos podía ir a 60 mph y frenaba, mientras que Andrea iba a 5 mph y aceleraba.
- Caen en un vacío.
- 40 m/s.
- Se mantiene igual.
- Usted ascenderá a la misma altura.
- Chocan al mismo tiempo.
- Galileo concluyó que los objetos caen con una aceleración constante cuando se ignora la resistencia del aire. Aristóteles planteó la hipótesis de que el objeto alcanza pronto una rapidez constante.
- La pelota más pesada choca primero.
- La canica tiene la aceleración más alta.
- Las aceleraciones son iguales.
- La creciente fuerza hacia arriba causada por la resistencia del aire hace que la aceleración hacia abajo disminuya continuamente.
- Mayor que.
- La mitad del tiempo.

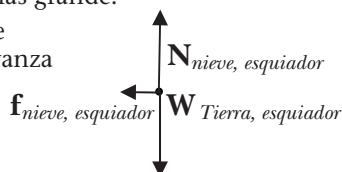
### Ejercicios

- 3530 km/h.
- 66 mph.
- 6.05 mph.
- 560 millas.
- 2.4 mph.
- 3.33 s, comparados con 10 s para los humanos.
- 25 h; no.
- 12.5 mph/s.
- 5 mph/s.
- 27 m/s.
- 13 m/s.
- 20 m.
- | Tiempo (s) | Altura (m) | Velocidad (m/s) |
|------------|------------|-----------------|
| 0          | 45         | 0               |
| 1          | 40         | 10              |
| 2          | 25         | 20              |
| 3          | 0          | 30              |
- 30 m/s; 3 s.

## Capítulo 3

### Preguntas

1. Los bocardillos parecen caer directo hacia abajo.
3. Una fuerza no equilibrada (la fricción) se opone al movimiento del automóvil.
5. La fuerza neta sobre cada automóvil es cero.
7. Debido a su inercia.
9. Debido a la inercia de usted.
11. La inercia del yunque evita que se mueva.
13. No, la inercia se refiere a lo difícil que es acelerar o frenar.
15. No, la fuerza neta normalmente apuntará en la dirección de cualquiera de las fuerzas individuales.
17. 50 N; 130 N.
19. El carro ahora acelera (aumenta la rapidez en forma indefinida) porque la fuerza neta no es cero.
21. Al este; todavía hacia el este.
23. La fuerza neta es hacia arriba.
25. Se duplica.
27.  $4 \text{ m/s}^2$ .
29. Su masa no cambia.
31. El peso es seis veces más grande.
33. Para un esquiador que frena hacia abajo y avanza hacia la derecha:



35. Si no hay resistencia del aire.
37. La fuerza hacia arriba de la resistencia equilibra la fuerza hacia abajo de la gravedad, por lo que la aceleración es cero.
39. La aceleración de cada uno es cero, de modo que la fuerza neta sobre cada uno debe ser cero.
41. La primera ley de Newton siempre es válida. Deben existir otras fuerzas que se oponen a la fricción, de modo que la fuerza neta es cero.
43. La fuerza friccional es igual a 400 N porque la fuerza neta es cero.
45. 250 N.
47. Son iguales y opuestas por la tercera ley de Newton.
49. Son iguales y opuestas por la tercera ley de Newton.
51. Cero.
53. De acuerdo con la tercera ley de Newton, existe una fuerza de reacción sobre el cañón.
55. La fuerza friccional del suelo sobre sus pies.
57. 40 N.
59. Las fuerzas actúan sobre objetos diferentes. La fuerza friccional del suelo sobre los cascos del caballo permite que el caballo mueva el carro.
61. Por la segunda ley de Newton, porque la fuerza neta es cero.

### Ejercicios

1. 14 N; 2 N; 10 N.

3. 250 N hacia atrás.
5.  $3 \text{ m/s}^2$ .
7.  $900\,000 \text{ m/s}^2$ .
9. 180 N.
11.  $1.67 \text{ m/s}^2$ .
13. 75 kg.
15. 5 N hacia abajo.
17.  $4 \text{ m/s}^2$ .
19. 162 N.
21. 10 N.
23.  $3 \text{ m/s}^2$ .

## Capítulo 4

### Preguntas

1. Ninguna.
3. Igual, según la tercera ley de Newton.
5. Es igual.
7. El área superficial se cuadruplica para el cubo y la esfera.
9. 200 N.
11. Porque la aceleración de la Luna no depende de su masa.
13. El doble de grande.
15. Porque también se mueve hacia los lados con la suficiente rapidez para coincidir con la curvatura de la Tierra.
17. Está en caída libre.
19. Están en caída libre.
21. No.
23. Las fuerzas gravitacionales son muy pequeñas.
25. La fricción atmosférica, aunque débil, todavía actúa.
27. Enviar un satélite para que orbite Venus.
29. Mayor.
31. Una disminución lenta en el tamaño de las órbitas planetarias.
33. No, París no está sobre el ecuador.
35. Parecería que el satélite se mueve hacia el oeste.
37. Como la masa de la Tierra es muchas veces más grande que la de la Luna, tiene una órbita mucho más pequeña respecto a su centro de masa común.
39. Más cerca de la marea baja.
41. La mitad del periodo rotacional, 4 h 55 min.
43. d; los efectos de la Luna y el Sol actúan juntos.
45. Los efectos se refuerzan, y producen un abultamiento más grande.
47. La fuerza adicional de la marea es minúscula.
49. Disminuye con el cuadrado de la distancia.
51. No es posible.

### Ejercicios

1.  $0.006 \text{ m/s}^2$ .
3.  $g/4 = 2.5 \text{ m/s}^2$ .
5. 60 N.
7.  $2F_{\text{anterior}}$ ; no.



9.  $0.25 \mathbf{F}_{\text{Tierra}}$ .
11. 12 660 km; 6290 km.
13.  $1.07 \times 10^{-7}$  N comparada con 200 N.
15. 200 N.
17.  $3.8 \text{ m/s}^2$ .
19. 264 000 km; 3060 m/s.
21. 1.93.
23. 40 N.

## Capítulo 5

### Preguntas

1. Su valor numérico no cambia.
3. Toby tiene razón.
5. Tienen inercias más grandes.
7. La fuerza neta sobre un objeto es igual al cambio en su momento, dividido entre el tiempo requerido para efectuar el cambio.
9. Aumentan el tiempo para que se detenga su pierna.
11. Igual.
13. Los impulsos son iguales.
15.  $8 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$  dirigidos hacia arriba.
17. Jeff siente más fuerza porque su maceta experimentó el mayor cambio en el momento.
19. Aumentan el tiempo de interacción y disminuyen las fuerzas.
21. En cada interacción hay cambios de momento iguales y opuestos. El momento total se conserva todas las veces.
23. 4 N que actúan durante 4 s.
25. La conservación del momento lineal requiere que la bala vaya en un sentido y el rifle en el otro.
27. La fuerza neta que ejercen los gases de escape sobre el sistema cohete-placa es casi cero.
29. La masa grande de la Tierra le permite adquirir un momento igual y opuesto a la pelota sin una velocidad mensurable.
31. En reposo.
33. Se mueven a la izquierda.
35.  $250 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$ .
37. Cero.
39. Dan al bote de remos un momento para alejarse del muelle.
41. Se conserva.
43. No sin ayuda externa, a menos que el astronauta tenga algo para lanzar.
45. La trayectoria B.
47. La trayectoria D.

### Ejercicios

1.  $36\,000 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$ .
3.  $62 \text{ m/s}$ .
5.  $5625 \text{ N}$ .
7.  $35\,000 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$  ( $= 35\,000 \text{ N} \cdot \text{s}$ ).
9. Impulso  $= 45\,000 \text{ N} \cdot \text{s}$ ;  $F_{\text{av}} = 5625 \text{ N}$ .

11. 240 N hacia arriba.
13. 900 N.
15.  $1.5 \text{ m/s}$ .
17. Cero.
19.  $66\,800 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$  (norte).
21. Cero.

## Capítulo 6

### Preguntas

1. El momento inicial del sistema es cero.
3. Conservación del momento.
5. Sí.
7. Un bote de motor que jala a un esquiador.
9. Una minivan.
11. Energías cinéticas iguales.
13. Dos bolas salen del otro lado con la misma rapidez que las bolas que llegan.
15. La altura a la que ella levantó la bola.
17. Disminuye.
19. Las energías cinéticas son iguales; el momento es mayor para el trineo más pesado.
21. Las fuerzas friccionales y la resistencia del aire realizan la misma cantidad de trabajo negativo.
23. Menor.
25. Ambos automóviles se detienen en la misma distancia.
27. No, la energía cinética perdida por un objeto durante un choque puede convertirse a muchas formas diferentes de energía.
29. La primera.
31. La elección para el cero de la energía potencial es arbitraria. Sólo son importantes las diferencias en la energía potencial.
33. La ganancia en la energía cinética es igual a la pérdida en la energía gravitacional potencial, y mantiene igual la energía mecánica.
35. La energía potencial está al máximo en cualquier extremo, y la energía cinética está al máximo en la parte inferior.
37. Disminuirá.
39. Conforme el satélite se acerca a la Tierra, disminuye su energía gravitacional potencial, y aumenta su energía cinética. Ocurre lo opuesto conforme el satélite se aleja de la Tierra.
45. El trabajo realizado al hacer surcos en la tierra o la arena reduce la energía cinética del camión.
47. La energía química potencial de la batería se convierte a energía térmica en los calcetines.
49. No podemos recuperar la energía perdida de los efectos friccionales.
51. Si el cabrestante funcionará durante más de 1 s, puede efectuar más de 600 J de trabajo.
53. Una unidad de energía.
55. Un kilowatt-hora es una unidad de energía.

**Ejercicios**

1. 360 000 J.
3. El momento no se conserva; por lo tanto, el choque pudo no haber ocurrido.
5. 10 J.
7. 2.1 J.
9. 11 N.
11. Negativo durante los 6 meses siguientes; 0 durante el año.
13. 396 kJ.
15. (a)  $-8.7$  J, (b) 0, (c) 0.
17. 30 J.
19. 144 kJ.
21. 2.73 caballos de fuerza.
23. 120 Wh = 0.12 kWh.

**Capítulo 7****Preguntas**

1. La velocidad de rotación es igual en todos los puntos de un cuerpo rotatorio.
3. Es igual.
5. Hacia la Estrella Polar.
7. Inercia rotacional.
11.  $\mathbf{F}_2$  porque actúa más lejos del eje.
13. La fuerza en el clavo es más grande porque actúa a través de un radio más pequeño que el de la fuerza aplicada al mango.
15. Su torsión respecto a la base de la escalera se equilibra con la torsión que ejerce la ventana; entre más arriba asciende, mayor es su torsión.
17. Debido a que Sam debe ejercer mayor fuerza, Sam debe estar más cerca del centro de la masa.
19. El volante de inercia con el radio más grande tiene la inercia rotacional más grande y es más difícil de detener.
21. Aumenta; disminuye.
23. Esfera.
25. Ninguna torsión externa perceptible actúa sobre la Tierra.
27. La ubicación del frente-parte posterior se determina al pesar por separado los neumáticos frontales y posteriores en una báscula para camiones. La razón de esas dos lecturas producirá la razón de las distancias del centro de la masa desde los dos ejes. Funciona el mismo procedimiento para la posición izquierda-derecha.
29. Bajo el pie de la figura.
31. Un diagrama debe mostrar que la fuerza que actúa en el centro de la masa está dentro de la base del cono invertido, incluso cuando está de punta.
33. Equilibrio estable.
35. La pared evita que usted se desplace hacia atrás, para mantener su centro de masa sobre sus pies.
37. El cuerpo del saltador se curva conforme pasa sobre la barra, lo cual hace que el centro de la masa esté afuera del cuerpo del saltador bajo la barra.

39. El cilindro gana. Ambos tienen la misma energía cinética, pero el aro tiene más de esta energía en forma de energía rotacional cinética debido a su inercia rotacional más grande.
41. Para contrarrestar la torsión del rotor principal que actúa sobre el helicóptero. Esta torsión es una reacción a la torsión aplicada al rotor principal.
43. Encogido.
45. La inercia rotacional más baja requiere una velocidad rotacional más grande para conservar el momento angular.
47. No, una parte de su cuerpo tiene un momento angular en una dirección, mientras que el resto de su cuerpo tiene un momento angular igual en la dirección opuesta.
49. Los surcos dan a la bala un momento angular para que no caiga en el vuelo.
51. El impulso que ejercen los gases de escape produce una torsión en el carrusel.
53. En la misma dirección (horizontal).
55. El automóvil no doblaría las esquinas debido al momento angular grande del volante de inercia. Utilice dos volantes de inercia que giren en direcciones opuestas.
57. En sentido dextrógiro.
59. Polaris parece inmóvil porque el eje de giro de la Tierra está alineado con ella.
61. (a) Hacia el suelo. (b) Hacia el cielo. (c) Hacia el suelo. (d) Cero.
63. La reducción del diámetro de las ruedas reduciría sus momentos angulares.

**Ejercicios**

1. 200 rpm, o 3.33 rev/s.
3.  $2.78 \times 10^{-4}$  rev/s.
5.  $-2500$  rpm/s.
7. 210 N · m.
9. 1800 N · m.
11. 2 m.
13. El lado izquierdo caerá porque tiene una torsión más grande.
15. 300 kg · m<sup>2</sup>/s.
17.  $L_m = 0.132 L_e$ ; la Tierra tiene el momento angular más grande.

**Capítulo 8****Preguntas**

1. Sólido, líquido, gas y plasma.
3. Tienen las mismas densidades.
5. Magnesio.
7. Los átomos del oro deben estar más cerca entre sí.
9. No son iguales porque los cristales tienen formas diferentes.
11. El diamante tiene enlaces fuertes en todas direcciones; el grafito tiene enlaces más fuertes entre los átomos en las capas bidimensionales.

13. El oxígeno sólido tiene una temperatura de fusión más baja.
15. Esférica.
17. La tensión superficial permite que la superficie del agua ascienda sin desbordarse.
19. Las moléculas del agua tienen una atracción más fuerte hacia el vidrio que entre sí.
21. Las partículas de gas son neutras, mientras que las partículas en un plasma y en los electrones son iones cargados.
23. La menor área superficial en el caso de la arcilla requiere mayor presión.
25. El volumen del agua líquida es menor que el del vapor, lo cual produce una menor presión en la lata.
27. Denver tiene una presión atmosférica más baja, de modo que se requerirían menos caballos.
29. Denver siempre se listaría como una región de baja presión.
31. Sus oídos le dolerían igual en ambos casos.
33. Son iguales.
35. Es mayor para el agua fría.
37. Es la presión atmosférica que determina la altura máxima.
39. Con la bomba en la parte inferior, puede aplicar presiones mucho más altas.
41. El líquido morado tiene mayor densidad.
43. Más alto en el agua salada.
45. Las fuerzas de flotación son iguales.
47. La reducción en el volumen reduce la fuerza de flotación y hace que usted se hunda.
49. El plomo flotará y el oro se hundirá.
51. El volumen no cambia. La expulsión de agua reduce el peso.
53. La fuerza de flotación es igual, porque ambos desplazan el mismo volumen.
55. Se mantiene igual, porque el volumen bajo la superficie es igual que el volumen del hielo cuando se derrite.
57. El aire de rápido movimiento crea presiones más bajas encima de la moneda, lo cual produce una fuerza hacia arriba neta.
59. De ese modo las pelotas caen después de pasar la red.
61. La presión del viento

### Ejercicios

1.  $10.5 \text{ g/cm}^3$ ; plata.
3.  $0.3 \text{ g/cm}^3$ .
5. 1200 kg.
7.  $0.09 \text{ m}^3$ .
9.  $1 \text{ cm}^3$ .
11. 100 000 N. 100 000 Pa. Es igual.
13. 7.5 pulg.
15.  $15 \text{ lb/pulg}^2$ .
17.  $750 \text{ kg/m}^3$ ; flotará.
19. 5 N.

21.  $0.9 \text{ g/cm}^3$ .
23. 79 300 N.

## Capítulo 9

### Preguntas

1. La energía gravitacional potencial se convierte a energía térmica.
3. El calor parecía producirse en forma interminable, lo que implicaba que no era una sustancia.
5. Ambos cambian la energía interna de un sistema y se miden en joules. El calor funciona a un nivel microscópico, mientras que el trabajo es un concepto macroscópico.
7. Si al principio el termómetro está a una temperatura diferente, debe fluir calor.
9. Sí, si comienzan con temperaturas distintas.
11. La temperatura no es una cantidad física y, por lo tanto, no puede fluir entre los objetos.
13. El calor es un flujo de energía térmica, mientras que la temperatura es una medida de la energía cinética promedio de los átomos y las moléculas. Observe que la temperatura no es una forma de energía.
15. Ningún estudiante tiene la razón.
17. Bajo todas las condiciones.
19. El agua.
21. No.
23. Menor.
25. Se requiere una inmensa cantidad de energía térmica para cambiar la temperatura del agua en los océanos.
27. Se congelará si se retira el calor y se fundirá si se agrega calor.
29. Se requiere mucha energía térmica para fundir el hielo sin cambiar su temperatura. Asimismo, el hielo no es un buen conductor de energía térmica.
31. Menos de  $40^\circ\text{C}$ .
33. Más energía interna en el vapor.
35. La energía interna debe aumentar por la primera ley. Sin embargo, si el aumento en la energía interna provoca un cambio de estado, el sistema puede permanecer a una temperatura fija.
37. Las moléculas de la barra intercambian energía cinética mediante choques.
39. El orden del mejor al peor es espuma de poliuretano, aire estático, vidrio y concreto.
41. No se congelará.
43. El ácido inoxidable tiene una conductividad térmica de alrededor de una sexta parte de la del hierro.
45. El suelo bajo el camino mantiene caliente el camino durante un rato.
47. El aire bajo las nubes está protegido del Sol y es más fresco. Al ser más fresco, es más denso y crea una corriente de aire descendente.
49. Ambos automóviles se calientan con radiación.
51. El vacío reduce la conducción y la convección, y el plateado reduce la radiación.

53. Por la expansión y la contracción del techo.  
 55. El espaciamiento sería más pequeño en la parte ancha.

### Ejercicios

1. 4000 cal.
3. 1200 J; 286 cal.
5. 10 cal.
7. 8 J.
9. 330 J.
11.  $0.278 \text{ cal/g} \cdot ^\circ\text{C}$ .
13. 124 cal.
15.  $-1^\circ\text{C}$ ;  $+4^\circ\text{C}$ .
17. (a) 1600 cal. (b) 1600 cal. (c) No cambia.
19. 6771 kJ.
21.  $1.73 \times 10^6 \text{ J}$ ; 1188 kJ.
23. 0.8 mm.

## Capítulo 10

### Preguntas

1. Un aislante.
3. La carga fluiría a todos los puntos en la superficie de la barra.
5. La humedad permite que una parte de la carga abandone el globo.
7. Para evitar la acumulación de carga que puede causar chispas.
9. La piel y el plástico produjeron cargas opuestas en las barras o una barra no está cargada.
11. Los objetos neutros tienen cargas positivas y negativas iguales.
13. Los objetos positivos y los objetos negativos atraen el polo norte de un imán, pero no los objetos neutros. También debe ser eléctricamente neutro.
15. Se repelerán.
17. Cero.
19. El globo induce una carga en la pared.
21. Las cargas inducidas en los extremos cercanos siempre son opuestas al objeto cargado, lo cual produce atracción.
23. Acerque la barra cargada al electroscopio. Si las hojas se acercan, la barra es negativa. Si las hojas se separan, la barra es positiva.
25. Toque el electroscopio con la barra.
27. Las cargas negativas fluyen a través de la mano hacia el suelo, y neutralizan el electroscopio.
29. La esfera A es negativa, y la esfera B es neutra.
31. Tocar una esfera cargada con una neutra produce dos esferas con la mitad de la carga cada una, el uso de dos esferas neutras produce cargas de una tercera parte, y así sucesivamente.
33. El diagrama d indica las fuerzas iguales y opuestas requeridas por la tercera ley de Newton.
35. La fuerza disminuye por un factor de 9.
37. La fuerza aumenta por un factor de 3.
39. 3.

41. La fuerza gravitacional siempre es atractiva, la carga eléctrica elemental no es proporcional a la masa inercial, la carga eléctrica viene en un tamaño, y la gravedad es mucho más débil.
43. Usted tiene muy poca carga eléctrica neta, y la fuerza gravitacional es demasiado débil.
45. Porque tienen masas diferentes.
47. 30 N hacia la izquierda.
49. La misma fuerza en cualquier punto entre las placas.
51. Sus magnitudes son iguales, sus direcciones son opuestas, y la fuerza sobre el protón es hacia arriba.
53.  $b > a > c = d$ , y tangente hacia las líneas del campo.
55. Mayor.
57. La velocidad en el punto B es mayor que  $v_0$ .
59. El trabajo requerido para llevar 1 coulomb de la referencia cero al punto en cuestión.
61. Se mueve hacia una energía potencial eléctrica más baja y un potencial eléctrico más bajo.

### Ejercicios

1.  $1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$ .
3.  $1.5 \times 10^{-17} \text{ C}$ .
5.  $4.05 \times 10^{-10} \text{ N}$ .
7.  $2.13 \times 10^{-6} \text{ N}$  (atractiva).
9.  $1.23 \times 10^{36}$ .
11. 800 N/C norte; 16 N sur.
13.  $1.13 \times 10^{10} \text{ N/C}$  hacia la carga.
15.  $2.16 \times 10^{11} \text{ N/C}$  hacia afuera.
17.  $3.6 \times 10^{10} \text{ N/C}$  hacia la carga 2-C.
19.  $8 \times 10^{-16} \text{ N}$ ;  $4.79 \times 10^{11} \text{ m/s}^2$ .
21.  $-10 \text{ J}$ .
23. 24 mJ.
25. 39 000 V.

## Capítulo 11

### Preguntas

1. Su duración.
3. 18 V.
5. Las diferencias son voltaje, corriente máxima disponible y carga máxima disponible; ambas suministran corriente directa.
7. c; a.
9. b; d.
11. Voltee la batería extremo por extremo.
13. Ninguna diferencia.
15.
 

B	D	F	B	D	F	B	D	F	B	D	F
A	C	E	A	C-E		A	C-E		A	C-E	
17. Un volt es una medida de la diferencia de potencial, y un ampere es una medida de la corriente.
19. Agua, volumen por unidad de tiempo, y presión.
21. Todos ellos.
23. Se duplica.



25. El mayor movimiento de los átomos con el aumento de temperatura provoca más choques con los electrones.
27. Conecte 22 bombillos en serie.
29. Igual.
31. Aumenta; disminuye.
33. Aumentó; disminuyó.
35. Mayor.
37. Menor.
39. Las baterías en serie con los bombillos en paralelo.
41. A es la más brillante; B y C están igual de atenuadas.
43. Permanece igual.
45. Todos estarán en corto.
47. Resplandecen igual.
49. Todos se apagan.
51. A está en corto; los otros resplandecen más.
55. En paralelo.
57. La energía se reduce a la mitad.
59. La misma.
61. El bombillo de 120 W.

### Ejercicios

1. 138  $\Omega$ .
3. 9.17 A.
5. 4 V.
7. 0.5 A.
9. 6  $\Omega$ ; 2 A.
11. 6 A; 2  $\Omega$ .
13. 70 W.
15. 0.55 A.
17. 3 A; 36 W.
19. 4400 W.
21. 202  $\Omega$ .
23. 0.16 kWh.
25. 36¢.

## Capítulo 12

### Preguntas

1. Ambos extremos de la barra no imantada atraerán ambos extremos de las dos barras.
3. El segundo experimento.
5. No.
7. 4.
9. El polo norte de la aguja de una brújula apunta en la dirección del campo.
11. En sentido dextrógiro.
13. En la misma dirección.
15. Hacia abajo en A; hacia arriba en B.
17. Hacia dentro de la página.
19. El campo magnético de un cable cancela el del otro cable.
21. Hacia fuera de la página.
23. Pudo golpear la aguja mientras la sostenía en el campo magnético de la Tierra.

25. Que disminuya.
27. 4 N/m en la dirección opuesta, según la tercera ley de Newton.
29. Si cada uno de dos cables paralelos lleva una corriente de 1 ampere, la fuerza por unidad de longitud en cada cable será  $2 \times 10^{-7}$  newtons por metro.
31. Polo norte magnético.
33. 20° oeste del norte.
35. Los rayos cósmicos viajan en espiral sobre las líneas del campo magnético hacia el Polo Sur.
37. No.
39. Se desvían en direcciones opuestas. El electrón tendrá la aceleración más grande debido a su masa más pequeña.
41. Hacia arriba; en sentido levógiro.
43. Se alejan; se impulsan contra él.
45. Igual.
47. La inserción del extremo sur en la bobina o el retiro del extremo norte.
49. Más grande.
51. Para invertir la dirección de la corriente en el circuito, compruebe que la torsión esté en la misma dirección.
53. Los campos eléctrico y magnético están perpendiculares a la dirección del viaje y entre sí. Oscilan en fase y viajan a la velocidad de la luz.
55. De sonido.
57. Tienen frecuencias y longitudes de onda diferentes.
59. Al modular la amplitud de la onda portadora.
61. 102.1 MHz.

### Ejercicios

1.  $4.5 \times 10^5$  G.
3.  $4.3 \times 10^{-4}$  T.
5.  $9.6 \times 10^{-13}$  N;  $1.05 \times 10^{18}$  m/s<sup>2</sup>.
7.  $1.2 \times 10^{-3}$  N; 0.6 m/s<sup>2</sup>.
9. 16.7  $\mu$ C.
11.  $1.5 \times 10^6$  m/s.
13. 0.12 T.
15. 30 circuitos.
17. 0.025 A; 20.
19. 20 A.
21. 1.28 s.
23. 12.2 cm; cerca de una quinta parte del tamaño del horno.
25.  $1 \times 10^{15}$  Hz.
27. 200-545 m.
29. 275 m.

## Capítulo 13

### Preguntas

1. Supernovas, estrellas de neutrones orbitantes y agujeros negros orbitantes.
3. La energía irradiada en forma de ondas gravitacionales es muy pequeña.

5. Taylor y Hulse encontraron un par de estrellas de neutrones que orbitaban entre sí y midieron que decreciera el periodo, tal como lo predice la teoría.
7. No si observamos un número muy grande de protones.
9. La fuerza gravitacional.
11. Circuitos diminutos.
13. 15 000 millones de años.
15. La gravitacional.
17. Para que escape la radiación cósmica, lo cual inundaría las señales de los neutrinos diminutos.
19. Las mediciones de las ondulaciones en el fondo de rayos cósmicos.
21. Cualquier problema de física, sin importar su complejidad, se puede comprender en términos de sus partes componentes.

# Créditos

Esta página constituye una extensión de la página legal. Nos hemos esforzado por rastrear la propiedad de todo el material protegido y por obtener autorización de los poseedores de los derechos de autor. En caso de que surgiera un cuestionamiento por el uso de cualquier material, no tendríamos inconveniente en hacer las correcciones necesarias en las ediciones futuras. Agradecemos a los autores, editores y agentes siguientes por su autorización para usar el material indicado.

## Texto

### Capítulo 1

p. 3: © Albert Einstein Archives. The Hebrew University of Jerusalem, Israel.

### Capítulo 2

p. 17: © C./Shutterstock.

### Capítulo 6

p. 95: © R. P. Feynman, R. B. Leighton y M. Sands, *The Feynman Lectures on Physics* (Glenview, IL: Addison-Wesley, 1963), 1: 4-1 y 4-2. Reimpreso con autorización.

## Fotografías

Páginas 7, 106, 112: © Larry D. Kirkpatrick. Páginas 10, 56, 64, 65, 68, 72, 74, 131, 188, 238, 248: Cortesía de © NASA. Páginas 29, 36, 41, 78, 84, 86, 87, 90, 119, 120, 121, 122, 123, 126, 130, 164, 183, 184, 221, 224, 225, 227: © David Rogers. Páginas 18, 30, 140, 150, 151, 152, 173, 211, 231: © George Semple. Páginas 34, 43, 139, 151, 171, 201, 206: © Charles D. Winters. Página 212: © Gerald F. Wheeler.

### Capítulo 1

p. 1: © Atlas Image Cortesía de 2Mass/IPAC-Caltech/NASA/NSF. p. 4: © Helen Rogers/Photo Stock; © Science Photo Library/Photo Stock. p. 5: © Rubén Avila/fillius.net. p. 9: © Jacques Descloîtres, MODIS Land Rapid Response Team, NASA/GSFC. p. 10: © Luklyanova Natalia/Shutterstock.

### Capítulo 2

p. 14: © Evren Kalinbacak/Shutterstock. p. 15: © Royalty-Free/Corbis; © Andy Magee/Shutterstock. p. 16: © Darren J. Bradley/Shutterstock; © Christian Delbert/Dreamstime. p. 18: © Poulsons Photography/Shutterstock. p. 19: © Fstockfoto/Shutterstock. p. 21: © Tom Hirtreiter/Shutterstock. p. 23: © Hogar/Shutterstock. p. 24: © North Wind Picture Archive. p. 26: © Humberto Núñez. p. 27: © Digital Vision/Getty Images.

### Capítulo 3

p. 33: Cortesía de U.S. Army Parachute Team, Golden Knights. p. 37: © Georgios Kollidas/Shutterstock. p. 47: © Zimmytws/Shutterstock. p. 48: © Fahrner78/Dreamstime. p. 52: © Dale A. Stork/Shutterstock. p. 54: © Tomas Hajek/Dreamstime.

### Capítulo 4

p. 58: © Nicku/Dreamstime. p. 59: © Catalin Petolea/Shutterstock. p. 64: © Royalty-Free/Corbis. p. 65: © Txemanet/Dreamstime. p. 68: © Wemer Münzker/Dreamstime; © Richard Mc Nab/Dreamstime. p. 69: © Marcel Clemens/Shutterstock. p. 70: © Rubén Avila/fillius.net.

### Capítulo 5

p. 79: © Mrsanpedro/Dreamstime. © Royalty-Free/Corbis. p. 80: © Hxdbzy/Dreamstime; © Shariff Che' Lah/Dreamstime. p. 85: © Egd/Shutterstock. p. 86: © Photodisc Green/Getty Images. p. 87: © Science Photo Library/Photostock.

### Capítulo 6

p. 93: © Cristovao/Shutterstock; p. 96: © Corina Rosul/Dreamstime. p. 103: © Jerry Zitterman/Shutterstock. p. 105: © Jessmine/

Shutterstock. © Bohuslav Mayer/Dreamstime; © SOHO/NASA/ESA. p. 108: © Bureau of Reclamation. p. 109: © Spacephotos.com/Photostock. p. 112: p. 113: © Monkey Business Images/Dreamstime; © Lorraine Swanson/Shutterstock. p. 114: © Benkrut/Dreamstime.

### Capítulo 7

p. 116: © Royalty-Free/Corbis. p. 126: © Agence Nature/Photo Stock/Tony Campbell; p. 130: © Benjamin Haas-Shutterstock/Marek Uliasz-Dreamstime; © Sportgraphic/Dreamstime. p. 131: © Margojh/Dreamstime; © Steffen Foerster/Dreamstime.

### Capítulo 8

p. 135: © Terric Delayn/Shutterstock. p. 139: © Yaroslav/Shutterstock; Cortesía de Leonard Fine. p. 140: © Donna Martínez/Dreamstime. p. 141: © Ljupco Smokovsky/Dreamstime; © Roman Krochuck/Dreamstime; © Levent Konuk/Shutterstock; p. 143: © Patryk Kosmider/Dreamstime. p. 144: © Mike Heywood/Shutterstock. p. 145: © Michael Ludwig/Dreamstime. p. 147: © Arne9001/Dreamstime. p. 149: © Kennamer/Shutterstock. p. 151: © Henry Beeker/Dreamstime. p. 153: © Gabriel Mitrache/Shutterstock; © Vesna Njagulj/Dreamstime.

### Capítulo 9

p. 155: © Carla F. Castagno/Dreamstime. p. 159: © The Bridgeman Art Library. p. 164: © Paiphoto9/Dreamstime. p. 165: © Bambi L. Dingman/Dmytro Tolokonov/Dreamstime. p. 166: A.A. Bartlett, Universidad de Colorado, Boulder; © Royalty-Free/Corbis. p. 167: © Carla F. Castagno/Dreamstime. p. 170: © Dibrova/Shutterstock; © RicardoMiguel.pt/Shutterstock. p. 173: © Vladislav Siaber/Stocklib; © Alexander Kolomietz/Dreamstime. p. 174: © Dibrova/Shutterstock.

### Capítulo 10

p. 177: © Packowacz/Shutterstock. p. 181: © Georgios Kollidas/Dreamstime. p. 187: Cortesía de © Prof. Clint Sprott, Universidad de Wisconsin-Madison. 188: © Royalty-Free/Corbis. p. 193: © James Horn/Dreamstime.

### Capítulo 11

p. 200: © Jack Alello/Shutterstock; p. 213: Cortesía de Marc Sherman.

### Capítulo 12

p. 220: © Taxi/Getty Images. p. 223: © PSSC Physics, 2a. ed., 1965, D. C. Heath & Co. y Educational Development Center, Inc., Newton, Mass. p. 225: © Dembinsky Photo Associates. p. 226: © Argonne National Laboratory y el U.S. Department of Energy. p. 229: © Kevin Schafer/Photographer's Choice/Getty Images. p. 236: Usada con permiso de © Harper Collins Children's Books, 1955. p. 237: © North Wind Picture Archives. p. 238: © Ricky Corey/Dreamstime. p. 239: Cortesía de © Panasonic. p. 244: © Martin Dohrn/Science Photo Library/Photo Researchers.

### Capítulo 13

p. 250: Cortesía de © Caltech/LIGO. p. 251: Cortesía de © NASA/JPL-Caltech. p. 253: Cortesía de © Particle Data Group, Lawrence Berkeley National Laboratory 2000. p. 254: Fotografía por Robert Isear, cortesía de © AIP Emilio Segrè Visual Archives, Physics Today Collection. pp. 256 y 257: Cortesía de SNO Institute. p. 258: Cortesía de © Chris Kyba/SNO Institute.

## Interludios

p. 75: © Sergioboccardo-Shutterstock/Pete Favelle-Dreamstime. p. 245: © Floyd Dean/Taxi/Getty Images. p. 246: © Bettmann/Corbis.





# Glosario

**aceleración promedio** El cambio en la velocidad dividido entre el tiempo que tarda efectuar el cambio,  $\bar{a} = \Delta v / \Delta t$ ; se mide en unidades como (metros por segundo) por segundo. Una aceleración puede ser el resultado de un cambio en la rapidez, un cambio en la dirección, o ambos.

**aceleración de rotación** El cambio en la rapidez rotacional dividido entre el tiempo que tarda el cambio.

**aislante** Un material que no permite el paso de una carga eléctrica o es un débil conductor de la energía térmica. La cerámica es un buen aislante eléctrico; la madera y el aire inmóvil son buenos aislantes térmicos.

**ampere** La unidad de corriente eléctrica del SI; 1 coulomb por segundo. La corriente en cada uno de dos cables paralelos cuando la fuerza magnética por unidad de longitud entre ellos es  $2 \times 10^{-7}$  newtons por metro.

**calor** La energía que fluye debido a una diferencia en la temperatura.

**calor específico** La cantidad de calor requerida para aumentar 1 grado la temperatura de una unidad de masa de una sustancia; se mide en calorías por gramo-grado Celsius o joules por kilogramo-kelvin.

**calor latente** La cantidad de calor requerida para fundir (o vaporizar) una unidad de masa de una sustancia. Se libera la misma cantidad de calor cuando se congela (o condensa) una unidad de masa de la misma sustancia; se mide en calorías por gramo o kilojoules por kilogramo.

**caloría** La cantidad de calor requerida para aumentar 1 °C la temperatura de 1 gramo de agua.

**cámara oscura** Una habitación con un orificio pequeño en una pared, utilizada por los artistas para producir imágenes.

**cambio de estado** El cambio en una sustancia entre sólido y líquido o entre líquido y gaseoso.

**campo** Una región del espacio en donde a cada lugar se asigna un valor o un vector. *Consulte* campo eléctrico, gravitacional, o magnético.

**campo gravitacional** El espacio que rodea a un objeto, en donde se asigna a cada lugar un vector por igual a la fuerza gravitacional experimentada por una masa de 1 kilogramo colocada en ese lugar.

**campo magnético** El espacio que rodea a un objeto magnético, en donde se asigna a cada punto un valor determinado por la torsión sobre una brújula colocada en ese punto. La dirección del campo está en la dirección del polo norte de la brújula.

**capacidad calorífica** La cantidad de calor requerida para aumentar 1 °C la temperatura de un objeto.

**centi** Un prefijo que significa  $\frac{1}{100}$ . Un centímetro es  $\frac{1}{100}$  metro.

**centrífuga** Un adjetivo que significa “que escapa del centro”.

**centrípeta** Un adjetivo que significa “que busca el centro”.

**centro de la masa** El punto de equilibrio de un objeto. El lugar en un objeto que tiene el mismo movimiento de traslación que el objeto si éste se encogiera hasta un punto.

**cero absoluto** La temperatura más baja posible: 0 K,  $-273$  °C, o  $-459$  °F.

**circuito completo** Una trayectoria de conducción continua desde un extremo de una batería (u otra fuente de potencial eléctrico) hasta el otro extremo de la batería.

**conducción** La transferencia de energía térmica mediante choques de los átomos contra las moléculas dentro de una sustancia.

**conductor** Un material que permite el paso de una carga eléctrica o la transferencia fácil de energía térmica. Los metales son buenos conductores.

**conservación del momento angular** Si la torsión externa neta sobre un sistema es cero, el momento angular total del sistema no cambia.

**conservación del momento lineal** El momento lineal total de un sistema no cambia si no existe una fuerza externa neta.

**conservado** Este término se usa en la física para expresar que no cambia un número asociado con una propiedad física; es constante.

**convección** La transferencia de energía térmica en los fluidos por medio de las corrientes, como el ascenso del aire caliente y el descenso del aire frío.

**corriente** El flujo de la carga eléctrica; se mide en amperes.

**cortocircuito** Una trayectoria en un circuito eléctrico que tiene muy poca resistencia.

**coulomb** La unidad de carga eléctrica en el SI. La cantidad de carga que pasa un punto específico en cada sección de un conductor que transporta una corriente de 1 ampere. La carga son  $6.24 \times 10^{18}$  protones.

**cristal** Un material en el cual los átomos se organizan en un patrón geométrico definido.

**cuadrado inverso** Una relación en la cual una cantidad tiene que ver con el recíproco del cuadrado de una segunda cantidad. Entre los ejemplos están las leyes de la fuerza para la gravedad y la electricidad; la fuerza es proporcional al cuadrado inverso de la distancia.

**densidad** Una propiedad del material igual a la masa del material dividida entre su volumen; se mide en kilogramos por metro cúbico o gramos por centímetro cúbico.

**desplazamiento** Una cantidad vectorial que proporciona la distancia en línea recta y la dirección desde una posición inicial hasta una posición final. En el movimiento ondulatorio (u oscilatorio), la distancia de la perturbación (o el objeto) desde su posición de equilibrio.

**elástico** Un choque o interacción en el cual se conserva la energía cinética.

**electroimán** Un imán construido al enrollar un cable alrededor de un núcleo de hierro. El electroimán se enciende y se apaga al activar y desactivar la corriente en el cable.

**en paralelo** Dos elementos de un circuito están conectados en paralelo cuando la corriente puede fluir por uno u otro, pero no ambos. Los elementos conectados en paralelo entre sí se conectan directamente entre sí en ambas terminales.

**en serie** Una disposición de las resistencias (o baterías) en una sola trayectoria, de modo que la corriente fluye a través de cada elemento.

**energía cinética** La energía del movimiento,  $\frac{1}{2}mv^2$ ; se mide en joules.

**energía cinética rotacional** La energía cinética asociada con la rotación de un cuerpo,  $KE = \frac{1}{2}I\omega^2$ ; se mide en joules.

**energía gravitacional potencial** El trabajo realizado por la fuerza de gravedad cuando un objeto cae desde un punto específico en el espacio hasta un lugar al que se asignó un valor de cero,  $GPE = mgh$ .

**energía interna** La energía microscópica total de un objeto, lo cual incluye sus energías cinéticas moleculares de traslación y de rotación, su energía vibratoria, y la energía almacenada en los enlaces moleculares.

**energía mecánica** La suma de la energía cinética y las diversas energías potenciales, entre las cuales están las energías potenciales gravitacional y elástica.

**energía térmica** La energía interna.

**equilibrio estable** Una posición de equilibrio u orientación en la cual un objeto regresa después de haber sido desplazado ligeramente.

**equilibrio inestable** Una posición de equilibrio u orientación desde la cual sale un objeto después de haber sido ligeramente desplazado.

**equilibrio térmico** Una condición en la cual no hay un flujo neto de energía térmica entre dos objetos. Esto ocurre cuando los dos objetos obtienen la misma temperatura.

**expansión térmica** El incremento en el tamaño de un material cuando se calienta.

**fricción cinética** La fuerza friccional entre dos superficies en movimiento relativo. Esta fuerza no depende mucho de la rapidez relativa.

**fricción estática** La fuerza friccional entre dos superficies en reposo respecto una de la otra. Esta fuerza es igual y opuesta a la fuerza neta aplicada si la fuerza no es lo bastante grande para conseguir que acelere el objeto.

**fuerza** Un impulso o una atracción, medidos por la aceleración que producen sobre un objeto como aislado común,  $\mathbf{F}_{\text{neta}} = m\mathbf{a}$ ; se mide en newtons.

**fuerza de flotación** La fuerza hacia arriba que ejerce un fluido sobre un objeto sumergido o flotante. *Consulte* principio de Arquímedes.

**gas** La materia sin ninguna forma o volumen definidos.

**gauss** Una unidad de intensidad del campo magnético;  $10^{-4}$  teslas.

**gravitación universal, ley de la**  $F = Gm_1m_2/r^2$ , en donde  $F$  es la fuerza entre dos objetos,  $G$  es una constante universal,  $m_1$  y  $m_2$  son las masas de los dos objetos, y  $r$  es la distancia entre sus centros.

**impulso** El producto de la fuerza y el tiempo durante el cual actúa,  $\mathbf{F}\Delta t$ . Esta cantidad vectorial es igual al cambio en el momento.

**inelástica** Un choque o interacción del cual no se conserva energía cinética.

**inercia** La resistencia de un objeto a un cambio en su velocidad. *Consulte* masa inercial.

**inercia de rotación** La propiedad de un objeto que mide su resistencia a un cambio en su rapidez rotacional.

**inercia, ley de la** *Consulte* movimiento, primera ley de Newton del.

**inversamente proporcional** Una relación en la cual dos cantidades tienen un producto constante. Si una cantidad aumenta por cierto factor, la otra disminuye por el mismo factor.

**joule** La unidad de energía del SI, igual a 1 newton que actúa sobre una distancia de 1 metro.

**kilo** Un prefijo que significa 1000. Un kilómetro son 1000 metros.

**kilogramo** La unidad de masa del SI. Un kilogramo de material pesa aproximadamente 2.2 libras en la Tierra.

**líquido** La materia con un volumen definido que adopta la forma de su recipiente.

**magnitud** El tamaño de una cantidad vectorial. Por ejemplo, la rapidez es la magnitud de una velocidad.

**masa** *Consulte* masa inercial, masa gravitacional, masa crítica y centro de masa.

**metro** La unidad de longitud del SI es igual a 39.37 pulgadas, o 1.094 yardas.

**mili** Un prefijo que significa  $\frac{1}{1000}$ . Un milímetro es  $\frac{1}{1000}$  metro.

**momento angular** Una cantidad vectorial que proporciona el momento rotacional. Para un objeto que orbita un punto, la magnitud del momento angular es el producto del momento lineal y el radio de la trayectoria,  $L = mvr$ . Para un objeto que gira, este es el producto de la inercia rotacional y la velocidad rotacional,  $L = I\omega$ .

**momento lineal** Una cantidad vectorial igual al producto de la masa de un objeto y su velocidad,  $\mathbf{p} = m\mathbf{v}$ .

**monopolo magnético** Un polo magnético hipotético aislado.

**movimiento, primera ley de Newton del** La velocidad de un objeto permanece constante, a menos que una fuerza desequilibrante actúe sobre el objeto.

**movimiento, segunda ley de Newton del** La fuerza neta de un objeto es igual a su masa por su aceleración:  $\mathbf{F}_{\text{neta}} = m\mathbf{a}$ . La fuerza neta y la aceleración son vectores que siempre apuntan en la misma dirección.

**movimiento, tercera ley de Newton del** Si un objeto ejerce una fuerza sobre un segundo objeto, el segundo objeto ejerce una fuerza igual de regreso sobre el primer objeto.

**newton** La unidad de fuerza del SI. Una fuerza neta de 1 newton acelera una masa de 1 kilogramo a una velocidad de 1 (metro por segundo) por segundo.

**notación de potencias de diez** Un método para escribir números en el cual un número entre 1 y 10 se multiplica por o se divide entre 10 elevado a una potencia.

**ohm** La unidad de resistencia eléctrica del SI. Una corriente de 1 ampere fluye por una resistencia de 1 ohm bajo 1 volt de diferencia de potencial.

**Ohm, ley de** La resistencia de un objeto es igual al voltaje que lo atraviesa dividido entre la corriente que lo atraviesa,  $R = V/I$ .

**onda electromagnética** Una onda formada por campos eléctricos y magnéticos oscilantes. En el vacío, las ondas electromagnéticas viajan a la velocidad de la luz.

**orden de magnitud** El valor de una cantidad redondeada a la potencia de 10 más cercana.

**peso** La fuerza de apoyo necesaria para mantener a un objeto en reposo respecto a un sistema de referencia. Para los sistemas inerciales, el peso es la fuerza de atracción de la Tierra para un objeto,  $W = mg$ .

**plasma** El cuarto estado de la materia, en el cual se despoja a los átomos de uno o más electrones para formar un gas de iones.

**polo magnético** Un extremo de un imán; es similar a una carga eléctrica.

**potencia** La velocidad con la que la inercia se convierte de una forma a otra,  $P = \Delta E/\Delta t$ ; se mide en joules por segundo, o watts.

En los circuitos eléctricos, la potencia es igual a la corriente por el voltaje,  $P = IV$ .

**principio de Arquímedes** La fuerza de flotación es igual al peso del fluido desplazado.

**principio de Bernoulli** La presión en un fluido disminuye conforme aumenta su velocidad.

**proporcional** Una relación en la cual dos cantidades tienen una razón constante. Si una cantidad aumenta por cierto factor, la otra se incrementa por el mismo factor.

**radiación** El transporte de energía mediante ondas electromagnéticas; las partículas emitidas en una desintegración radioactiva.

**rapidez instantánea** El valor límite de la rapidez promedio cuando el intervalo de tiempo se vuelve infinitesimalmente pequeño. La magnitud de la velocidad instantánea.

**rapidez promedio** La distancia recorrida dividida entre el tiempo transcurrido,  $\bar{s} = d/t$ ; se mide en unidades como metros por segundo, o millas por hora.

**rapidez de rotación** El ángulo de rotación o la revolución dividido entre el tiempo transcurrido,  $\omega = \Delta\theta/\Delta t$ .

**regla de los nodos de Kirchhoff** La suma de las corrientes que entran a cualquier nodo en un circuito es igual a la suma de las corrientes que salen de ese nodo.

**regla del bucle de Kirchhoff** Sobre cualquier trayectoria desde la terminal positiva hasta la terminal negativa de una batería, la caída del voltaje a través de los elementos resistivos encontrados debe ser la suma del voltaje de la batería.

**resistencia** La impedancia al flujo de la corriente eléctrica; se mide en volts por ampere, u ohms. La resistencia es igual al voltaje que atraviesa el objeto dividido entre la corriente que lo atraviesa,  $R = V/I$ .

**sólido** La materia con un tamaño y una forma definidos.

**Système International d'Unités** El nombre en francés del sistema métrico, o Sistema Internacional (SI) de unidades.

**termodinámica** El área de la física que atiende las relaciones entre el calor y otras formas de energía.

**termodinámica, ley cero de la** Si cada objeto A y B están en equilibrio termodinámico con el objeto C, en tal caso A y B están en equilibrio termodinámico entre sí. Los tres objetos están a la misma temperatura.

**termodinámica, primera ley de la** El aumento en la energía interna de un sistema es igual al calor agregado, más el trabajo efectuado sobre el sistema.

**termodinámica, tercera ley de la** Es posible acercarse experimentalmente al cero absoluto, pero nunca puede alcanzarse.

**tesla** La unidad del campo magnético de SI.

**torsión** El equivalente rotatorio de una fuerza. Es igual al radio multiplicado por la fuerza perpendicular al radio,  $\tau = rF$ ; se mide en newtons-metros. Una torsión neta produce un cambio en el momento angular de un objeto.

**trabajo** El producto de la fuerza sobre la dirección del movimiento y la distancia recorrida,  $W = Fd$ , se mide en unidades de energía, joules.

**unidad térmica británica** La cantidad de calor requerida para aumentar 1°F la temperatura de 1 libra de agua.

**vector** Una cantidad con una magnitud y una dirección. Entre los ejemplos están el desplazamiento, la velocidad, la aceleración, el momento y la fuerza.

**velocidad** Una cantidad vectorial que incluye la rapidez y la dirección del objeto; el desplazamiento dividido entre el tiempo transcurrido,  $\vec{v} = \Delta\mathbf{x}/\Delta t$ .

**velocidad promedio** El cambio en la posición —el desplazamiento— dividido entre el tiempo transcurrido,  $\vec{v} = \Delta\mathbf{x}/\Delta t$ .

**velocidad de rotación** Una cantidad vectorial que incluye la rapidez rotacional y la dirección del eje de rotación.

**viscosidad** Una medida de la fricción interna dentro de un fluido.

**watt** La unidad de potencia del SI, 1 joule por segundo.





# Índice analítico

Los números de páginas seguidos por e indican ecuación; por g indican definición de glosario.

## A

aceleración  
 cero, 33, 47, 155  
 constante, 26, 33, 41  
 de cargas, 196, 236, 238, 239, 249  
 de traslación, 117, 119-120  
 debido a  
 campo  
 eléctrico, 206, 226  
 magnético, 229  
 la aceleración gravitacional vs. campo eléctrico, 187  
 la gravedad, 26, 64, 70  
 diagrama de cuerpo libre, 45  
 fuerza neta y, 37-38, 41, 46, 98  
 promedio, 21g-21e-27, 42e  
 rotacional, 117g-117e, 119-120  
 acelerador, 256  
 acondicionador de aire, 170  
 aerogel de silicio, 137  
 agua  
 modelo, 204-206  
 limitaciones, 205  
 pesada, 256, 258  
 vapor, 168  
 agujero negro, 249, 259  
 aislante  
 eléctrico, 178g-181, 184  
 térmico, 165g-166, 171  
 Allen, Bryan, 109  
 amorfo, 143  
 amperímetro, 229, 231  
 ampere (unidad), 205g, 225g  
 aniquilación  
 partícula, 252  
 antielectrón, 187  
 antimateria, 258  
 antimesón, 258  
 antineutrón, 258  
 antipartícula, 252g-254  
 antiprotón, 258  
 antiquark, 258  
 año luz, 8  
 arcoiris, 259  
 Aristóteles, 23-25, 34-35, 46, 259  
 cuatro elementos de, 34  
 Arquímedes, 145, 147  
 principio, 145g-146  
 atómica(o)  
 bomba  
 estructura, 236  
 modelo (*consulte* modelo atómico)  
 orden, 139  
 átomo  
 carga eléctrica neta, 181

congelamiento del agua, 145  
 corriente y, 206  
 de cristal, 138-139  
 de líquidos, 139  
 de uranio, 143  
 en cero absoluto, 160  
 formación  
 de moléculas, 258-259  
 fuerza dominante, 188  
 líneas espectrales y, 196  
 plasma, 136, 141  
 atracción, 179-185, 189, 206, 221, 227  
 aurora  
 austral, 229  
 boreal, 141, 229

## B

barión  
 número, 252  
 barómetro, 142  
 batería, 201-213, 229  
 almacenamiento, 202  
 bombillo y, 203, 212  
 en paralelo, 202-203  
 en serie, 202  
 pila seca, 202  
 símbolo, 213  
 voltaica, 225  
 Becquerel, Henri, 246  
 Bernoulli, Daniel, 147  
 principio de, 146-147g-149  
 Betelgeuse, 167  
 Bode, William, 5  
 ley, 5-6  
 bombillo de luz, 203-212  
 común, 208-209, 211  
 en paralelo, 208-209  
 en serie, 208-209, 212  
 Bondi, Sir Hermann, 4, 246  
 Brahe, Tycho, 58  
 brújula, 222-227

## C

caballo de fuerza (unidad), 109  
 caída libre, 24-27, 45-46  
 calor, 99, 157g  
 capacidad, 161g-162  
 específico, 160-161g-161t-162, 166  
 unidades, 161  
 índice, 168-169t  
 Joule y, 158-159  
 latente, 163g-163t-164  
 unidades, 163  
 naturaleza de, 156

temperatura y, 159-160  
 trabajo y, 157  
 unidad, 157  
 caloría (unidad), 157g-158  
 calórico, 156  
 calorímetro, 159  
 cambio de estado, 163g  
 campo, 69g  
 eléctrico, 187-188g-189e-194, 213, 222, 235-237  
 alrededor de carga  
 negativa, 189  
 positiva, 189-190  
 líneas, 190g-192  
 unidades, 415  
 gravitacional, 69g-70, 187, 189, 192  
 magnético, 189, 222g-239  
 cerca de  
 cable, 223  
 imán en barra, 222  
 solenoide, 223  
 de la Tierra, 224, 227, 229  
 determinación de dirección, 223  
 inducido, 229-231  
 inversión, 228  
 límite teórico, 225  
 unidad, 225g  
 carga, 178g-194, 201-209, 221, 229, 233-236  
 campo eléctrico y, 188-192, 222  
 conservación, 180g-181, 204, 208, 209  
 corriente y, 206-209, 225  
 de prueba, 189-192  
 dos tipos, 178-180, 187  
 electroscopio, 183-185, 201, 221  
 elemental, 186  
 fuerza eléctrica y, 185-186  
 inducida, 182, 187  
 ondas electromagnéticas y, 236, 249  
 por inducción, 181-182, 185  
 unidad, 45g, 186g  
 vs. masa, 187-188  
 cargada, 178g-194  
 Cavendish, Henry, 62  
 centi, 7g  
 centro de masa, 121g-127  
 cerámica, 226  
 cero absoluto, 226g  
 chispa, 177, 179, 194  
 choque, 77-78, 80, 83-86  
 atómico, 158, 165  
 elástico, 96g-97  
 inelástico, 96g-97

científica(o)  
 aceptación, 4  
 base, 6  
 comprobación, 4  
 mérito, 2  
 modelo, 2  
 proceso, 3-4  
 salto creativo, 2  
 cinturones de radiación de Van Allen, 141  
 circuito, 186, 193, 201-214, 232, 239  
 completo, 203g-204  
 cortocircuito, 209, 212  
 en hogar, 202, 205, 211, 213  
 en paralelo, 209-211  
 en serie, 208-209  
 interruptor, 211  
 Concorde, 19  
 Conde Rumford, 156-157  
 conducción, 164g-167  
 conductividad térmica, 165t  
 conductor, 165g, 178-179, 202-205, 226  
 conexión a tierra, 178-179g  
 conmutador, 232  
 conservación, ley de la, 87  
 conservado, 76-77, 82g  
 constante, 76-77, 94, 96, 104  
 de Coulomb, 186  
 de Planck, 252  
 gravitacional, 61-62  
 contacto térmico, 158, 161  
 convección, 164, 166g-168  
 Cooper, Leon, 226  
 Copérnico, Nicolás, 57-58  
 movimiento planetario, 24  
 corriente, 177, 200, 203g-204e, 214, 246  
 alterna, 202, 231  
 atómica, 223-224  
 campo magnético  
 de la Tierra y, 227-228  
 y, 223, 228-231, 234, 236  
 circuitos, 223-224  
 convección, 166  
 debido a relámpago, 193  
 dirección, 205  
 directa, 203, 232  
 electroimán, 225  
 en modelo de agua, 204  
 estándar, 207  
 inducida, 229-233  
 modelo, 207  
 de voltaje y, 209  
 potencia y, 213e-214  
 resistencia y, 206e  
 super, 226  
 unidad, 205, 225  
 cosmología, 258  
 coulomb (unidad), 186g, 206g

Coulomb, Charles, 185  
 constante, 186  
 ley, 186  
 crecimiento exponencial,  
 106-107  
 cristal, 135, 138g-139  
 cuadrado inverso, 59g-60,  
 185g-187  
 cuanto  
 desarrollo, 160  
 interacciones, 160

## D

Dalton, John, 160  
 Davis, Ray, 256  
 densidad, 136g-136e-140,  
 255  
 aerogel de silicio, 137  
 aire, 137  
 atmósfera, 142  
 energía oscura, 256  
 espacio, 137  
 estrella de neutrones, 137  
 flotación, 145  
 grasa corporal, 147  
 hielo, 145, 171  
 materiales comunes, 137t  
 muscular, 147  
 Tierra, 138  
 Universo, 255-256  
 desintegración  
 protón, 252  
 desplazamiento, 20g, 38  
 detector  
 de ondas gravitacionales,  
 249-250  
 diagrama de cuerpo libre,  
 44-45  
 diferencia de potencial, 194,  
 201-202, 205-206,  
 211  
 dínamo, 159  
 Dios, 34, 58  
 distancia, 98  
 de paro, 99  
 Dubouchet, Karine, 48

## E

efecto  
 invernadero, 167  
 Einstein, Albert  
 cita, 167  
 equivalencia energía/masa,  
 256  
 espacio-tiempo, 259-260  
 idea(s)  
 de Dios, 34  
 Maxwell y, 237  
 Newton y, 237  
 proceso científico, 3-4  
 general, 87, 248-249, 251,  
 255  
 eje  
 magnético de la Tierra, 227  
 rotación, 117-121, 126, 227  
 rotacional, 227  
 eléctrica(o)  
 aislante, 178g-181, 184  
 campo (*consulte* campo  
 eléctrico)  
 carga (*consulte* carga)

chispa, 177, 179, 194  
 circuito (*consulte* circuito)  
 conductor, 165g, 178g-179,  
 202-205, 226  
 conexión a tierra, 178-179g  
 corriente (*consulte*  
 corriente)  
 diferencia de potencial,  
 194, 201-202, 205,  
 204, 211  
 energía (*consulte* energía  
 eléctrica)  
 fuerza (*consulte* fuerza  
 eléctrica)  
 generador, 226, 231-232  
 motor, 226, 231-232  
 potencia, 213g-213e, 231  
 potencial, 194g-194e, 226  
 unidades, 194  
 resistencia, 205-206e-206g,  
 211, 214, 226  
 trabajo, 192, 205  
 voltaje (*consulte* voltaje)  
 electricidad, 177-181, 188,  
 193  
 costo, 212  
 de batería, 204  
 en el hogar, 201-203, 208,  
 212  
 estática, 201  
 flujo, 181, 204-206  
 generación, 232  
 gravedad y, 186-188  
 magnetismo y, 220-223,  
 229, 234-237, 251  
 peligro, 207  
 relámpago, 193  
 uso, 201  
 electrodo, 202  
 electrolito, 202  
 electromagnetismo, 220  
 electrón, 4, 178-181, 186-188,  
 192-194, 205-206,  
 212, 223, 226,  
 238-239  
 aceleración, 187  
 antielectrón, 187  
 carga, 186  
 comportamiento, 246  
 electricidad y, 179, 187-188  
 fuerza  
 eléctrica y, 183, 188, 206  
 gravitacional y, 188  
 luz y, 200  
 masa, 188  
 ondas electromagnéticas y,  
 239  
 positrón y, 254  
 rayos X y, 238  
 relámpago, 193  
 superconductividad y, 226  
 electroscopio, 183-185, 201,  
 221  
 electrostática, 228, 246  
 elemento  
 formación, 258  
 química, 136  
 en serie, 202g  
 energía, 93-111  
 cinética, 140, 147, 156-157,  
 192, 206  
 atómica, 251  
 cambio en, 97-100e-111  
 de traslación, 95g-95e-108,  
 124, 159, 163

promedio  
 atómica, 159  
 molecular, 136, 160,  
 164-165  
 rotacional, 124g-124e,  
 159-161  
 unidades, 124  
 unidades, 95  
 conservación, 87, 93-111,  
 164, 213  
 circuitos, 210  
 fallas, 156  
 mecánica, 101-104  
 primera ley de la termo-  
 dinámica, 159-160  
 térmica, 161  
 constante, 77  
 convección, 168  
 crisis energética, 260  
 elástica potencial, 105  
 eléctrica, 93, 107-110, 202,  
 210-213, 226  
 equivalencia con la masa,  
 256  
 interna, 157-159g, 161,  
 163  
 mecánica, 101g-101e-107,  
 156, 158  
 enlaces moleculares,  
 159  
 microscópica, 159  
 naturaleza cuántica, 246  
 nuclear, 141  
 para invertir la energía  
 magnética de la  
 Tierra, 228  
 potencia, 109  
 potencial, 156-157  
 nuclear, 106  
 solar, 257  
 temperatura y, 158, 160  
 térmica, 107-108, 155,  
 157g-158, 163, 167,  
 213, 226  
 total, 102-103  
 unidades, 157-158  
 uso, 106-107  
 vector, 95  
 vibratoria, 159, 161  
 onda  
 electromagnética, 249  
 gravitacional, 249, 251  
 oscura, 255-256  
 potencial  
 eléctrica, 163, 192g, 194  
 electromagnética, 106  
 friccional, 106-107  
 gravitacional, 100g-  
 100e-107, 124, 147,  
 157, 163, 192, 210  
 química, 202  
 cinética, 96-97  
 ¿engaño?, 107  
 equilibrio, 76  
 estable, 123g  
 inestable, 123g  
 térmico, 158g, 164,  
 167-168  
 Esopo, 13  
 espacio, 15  
 deformado, 4  
 tiempo, 260  
 espectro  
 electromagnético, 237-238  
 estabilidad, 123

estado(s)  
 de la materia, 136, 138  
 estereofónico, 239  
 estrella  
 de neutrones, 249-250  
 Polar, 127  
 estroboscopio, 17  
 estructura  
 cristalina, 135, 139  
 evaporación, 168  
 expansión térmica, 170g-  
 170e-171  
 coeficiente, 170  
 exponente, 9, 11

## F

factor de congelación, 168-  
 169t  
 Faraday, Michael, 159, 181,  
 229-232, 236-237  
 ley de, 230  
 Feynman, Richard, 94, 111,  
 258  
 filamento, 203  
 Física Hágalo usted mismo  
 altura de péndulo, 103  
 atracción inducida, 182  
 batería, 201  
 bolas de billar, 86  
 caída libre, 25  
 cambio de estado, 163  
 centro de masa, 122  
 circuitos completos, 179  
 cohete modelo, 88  
 conductividad, 165  
 conservación de la energía  
 potencial y cinética,  
 96  
 cristal, 138  
 densidad, 138  
 efecto de Bernoulli, 148  
 elasticidad de material, 96  
 energía  
 térmica, 164  
 equilibrio térmico, 159  
 estructura cristalina, 139  
 fabricación de un imán,  
 224  
 flotación, 211  
 fricción, 47  
 gancho colgante, 123  
 impulso, 80  
 inercia, 36  
 rotacional, 125  
 interruptores de tres vías,  
 212  
 materiales magnéticos, 221  
 momento angular, 127  
 órbita(s)  
 geosíncrona, 66  
 satelitales, 65  
 peso en un elevador, 50  
 potencial eléctrico, 194  
 tensión superficial, 139  
 tiempo de reacción, 27  
 tipos de carga, 180  
 torsión, 118  
 velocidad  
 promedio, 16  
 flotación, 144-145  
 fluido, 140-141, 145-147, 149,  
 166

- fotografía estroboscópica, 16, 21  
 fotón, 252, 254  
 Franklin, Benjamin, 180  
   biografía, 181  
 frecuencia, 237-238, 250  
   de audio, 238  
   luz visible, 237  
   portadora, 238-239  
 fricción, 35, 46, 127  
   cinética, 47g  
   estática, 47g  
   fuerza (*consulte* fuerza friccional)  
 fuerza, 37g-50, 77, 223, 225, 228, 249, 251, 252, 259  
   centrípeto, 228  
   color, 251  
   constante, 40  
   cuatro fuerzas básicas, 57  
   de enlace, 136  
   de flotación, 139, 144g-147, 157  
   desequilibrada, 38  
   diagrama de cuerpo libre, 44-45  
   eléctrica, 136, 181, 185-189e, 192, 206, 235  
   electrodébil, 252  
   electromagnética, 57, 106, 249-254  
   friccional, 99, 111  
   gravitacional, 42, 57, 61-70, 81, 99, 126-127, 148, 157, 187, 252-253, 258  
   centro de masa y, 66  
   cerca de la Tierra, 63  
   desarrollo con el Universo y, 253, 258  
   en la Luna, 65  
   en nivel atómico, 136-137  
   en otros planetas, 64  
   entre dos objetos, 61  
   fuerza eléctrica y, 249  
   gran teoría unificada y, 252  
   mareas y, 67  
   débil, 57, 253-254  
   fuerte, 57, 251-253  
   intermolecular, 139, 143  
   magnética, 225-228e-229, 233  
   neta, 40-41e-50, 98-99, 103, 119, 125, 141, 145, 147  
   cero, 38, 49, 119  
   momento de cambio, 116  
   normal, 44-45  
   nuclear, 106, 252  
   presión y, 141-142, 256  
   resistencia del aire y, 148  
   rotaciones y, 117-123  
   separación durante Big Bang, 251  
   tercera ley, 47-50  
   unificada, 252  
   vectorial, 41, 70  
 fusible, 211  
 fusión, 138-141, 258-259  
   punto de, 163t-164  
   temperatura de, 136
- G**  
 galaxia, 1, 78, 126  
   Andrómeda, 68  
   Vía Láctea, 10, 68  
 Galileo, 24-27, 35-37, 77  
   aceleración debido a la gravedad y, 25  
   Aristóteles y, 23, 46  
   biografía, 24  
   conservación de la energía, 102  
   estilo científico, 24-27  
   experimento imaginado, 35  
   Huygens y, 77  
   Kepler y, 58  
   movimiento, 25  
   Newton y, 36, 46  
   telescopio, 4  
 Galvani, Luigi, 201  
 gas, 135-136, 140g-141  
   convección en, 166  
   ideal, 140, 170  
   real, 161  
   gauss (unidad), 225g  
   generador, 226, 231-232  
   Gilbert, William, 178, 180, 222  
   giro, 528, 580-585  
   giroscopio, 126  
   Glashow, Sheldon, 252  
   Goitschel, Philippe, 48  
   Goldberg, Rube, 4  
   grados (unidad), 117  
   gravedad, 2, 38, 56, 59, 248, 255-256  
   aceleración (*consulte* aceleración debido a la gravedad)  
   agujero negro, 2, 249, 250  
   centro de masa, 121, 125-127  
   concepto, 57  
   efecto sobre la atmósfera, 141  
   en la Luna, 64  
   en los planetas, 64  
   onda (*consulte* onda gravitacional)  
   gravitación, 181  
   campo (*consulte* campo gravitacional)  
   constante gravitacional, 62, 63  
   fuerza (*consulte* fuerza gravitacional)  
   ley de la gravitación universal, 61g-61e-66  
 Guerrouj, Hicham El, 19
- H**  
 Halley, Edmund, 37  
 Hertz, Heinrich, 236, 246  
 Hilbert, David, 87  
 Hitler, Adolf, 87  
 Hooke, Robert, 37  
 Hulse, Russell, 250-251  
 hundimiento, 144-145  
 Huygens, Christian, 37, 77
- I**  
 imán, 182, 221-239  
   barra, 182, 222-223, 229-231
- herradura, 225  
 permanente, 221  
 impulso, 80g-80e-81, 87  
   energía cinética e, 80-99  
   unidad, 80  
 inducción, carga por, 181-182, 185  
 inercia, 35g-38, 79  
   confinamiento de traslación, 120  
   fuerza (*consulte* fuerza inercial)  
   Kepler e, 58  
   ley de la, 37g  
   rotacional, 120g, 124-125  
 inflación, 255  
 interacción  
   color, 252  
   electrodébil, 252  
   fuerte, 251-252  
 interruptor, 205, 212  
   de tres vías, 212  
   símbolo, 212-213  
 inversamente proporcional, 41g  
 ion, 136, 141, 194
- J**  
 Jefferson, Thomas, 6  
 Joule, James, 157-158  
   biografía, 159  
 Joyner, Florence Griffith, 19  
 joule (unidad), 95g
- K**  
 Kepler, Johannes, 57-58, 60, 126  
   biografía, 58  
   tercera ley, 58  
 kilo, 7g  
 kilogramo (unidad), 6, 8g, 41g  
 kilómetro (unidad), 7  
 kilowatt-hora (unidad), 110, 212-213  
 Kirchhoff, Gustav, 209  
   regla de los nodos, 209g  
   regla del bucle, 210g-211  
 Kittinger, Joseph, 48  
 Koshiba, Masatoshi, 256
- L**  
 láser, 250  
 Lavoisier, Antoine, 77  
 Leibniz, Gottfried, 37  
 Lenz, ley de, 230, 231  
 leptón, 251, 254  
 ley  
   de la conservación, 87  
   de la física, 258  
   de la naturaleza, 76, 78  
   fundamental de la física, 180  
 libra (unidad), 6, 42  
 líquido, 135-136, 139g-143, 161, 163, 165, 170-171  
   cristal, 143  
   longitud de onda, 238
- Lord Kelvin. *consulte* Thomson, William  
 lugar natural, 34-35, 46-47, 57
- Luna  
   aceleración, 59-60  
   atmósfera, 25  
   causa de mareas, 65  
   masa, 64  
   movimiento, 56  
   órbita, 10, 57-59  
   periodo orbital, 65  
 luz, 156, 213  
   láseres (*consulte* láser)  
   momento lineal (*consulte* momento lineal)  
   ondas  
     electromagnética, 249  
     ultravioleta, 246  
   visible, 237-238  
   rango, 237
- M**  
 MacCready, Paul, 109  
 MACHOs, 255  
 magnética(o), 402  
   campo (*consulte* campo magnético)  
   electromagnética, fuerza (*consulte* fuerza magnética)  
   monopolo, 222g  
   polo, 221g-223, 227, 229  
   variación, 227  
 magnetismo, 220-237, 251  
 magnetizar, 221-224, 228, 233  
 magnitud, 20g  
 mareas, 66-70  
 masa, 2, 8, 41g-44, 46, 49-50, 61-70, 76-77, 192  
   calor y, 156, 160-162  
   causa de ondas gravitacionales, 249  
   centro de, 121g-127  
   conservación, 77g  
   crítica, 255  
   de la Luna, 64  
   de la Tierra, 49  
   del Universo, 254  
   densidad y, 136-137, 171  
   electrón, 187-188, 257  
   enana blanca, 137  
   energía y, 95, 99, 103-105  
   equivalencia para la energía, 256  
   estrella de neutrones, 250  
   gravitacional, 187  
   inercial, 41  
   ley de  
     gravitación universal y, 61  
   momento  
     angular y, 42  
     lineal y, 79-86  
   neutrino, 256-257  
   protón, 187-188  
   unidad, 8, 41  
   vs. peso, 43  
 materia, 76, 252-255  
   oscura, 255-256  
 Maxwell, James Clerk, 251  
   biografía, 237

ecuaciones, 236, 237  
 ondas electromagnéticas, 246  
 McKinney, Steve, 48  
 mecánica cuántica, 86, 471, 594, 599  
 mesón, 258  
 metro (unidad), 6-7g  
 microondas, 237  
 microscópicas, 139  
 mili, 8g  
 modelo, 34  
   atómico, 3, 136  
   Big Bang, 252, 254  
   científico, 2  
   común, 254  
   físico, 4  
   fluido eléctrico, 178-180  
   Sistema Solar, 136  
 modulación  
   amplitud, 238  
   frecuencia, 238  
 molécula, 4, 188, 194  
   cambio de estado y, 163-164  
   en gases, 140  
   en líquidos, 139-140  
   formación, 259  
 momento  
   angular, 124g-124e-126  
     conservación, 87, 12g-125  
   cambio en, 98  
   lineal, 77, 79g-88, 116, 126  
     cambio en, 80e-87  
     conservación, 78, 79e, 81-82g, 88, 96-97, 125  
   unidad, 79  
 monofónico, 239  
 motor, 226, 231-232  
   de vapor  
 movimiento  
   balón de fútbol americano, 15  
   circular, 57  
   de cuerpos celestes, 57-62  
   de la Tierra, 15  
   de proyectil, 117, 125, 148  
   de rotación, 116-127  
   de traslación, 116, 121  
   Galileo, 26  
   leyes del, 37-50  
   natural, 23-26  
   perpetuo, 260  
   unidimensional, 15-27, 37-50  
   vibratorio, 160  
 mundo  
   material, 136  
   real, 2

## N

naturaleza  
   ley de la, 76, 78  
 neutrino, 256-258  
   electrón, 256-257  
   masa, 256-257  
   muón, 256-257  
   tauón, 256-257  
 neutrón, 11, 180, 250-255, 258  
   antineutrón, 258

formación durante Big Bang, 254, 258  
 fuerza nuclear (*consulte* fuerza nuclear)  
 newton (unidad), 42g  
 Newton, Sir Isaac, 36-50, 181, 236-237, 259-260  
   biografía, 37  
   cita, 5, 249  
   constantes y, 77  
   Franklin y, 181  
   Galileo y, 36, 46  
   Halley y, 37  
   Hooke y, 37  
   Huygens y, 37  
   Kepler y, 58  
   la gravedad y, 56, 58, 70  
     ley de la gravitación universal, 61  
   la reina Ana y, 37  
   Leibniz y, 37  
   leyes, 60, 68-70, 77, 85  
   presión y, 142  
   primera ley, 36-37g-38, 55, 102, 117, 144, 146  
     para la rotación, 118  
   segunda ley, 70, 77, 79, 98, 103  
     para la rotación, 120  
   tercera ley, 81, 82, 121, 130, 148, 186, 225  
 Noether, Amalie Emmy, 87  
   biografía, 87  
   fuerza (*consulte* fuerza normal)  
 notación de potencias de diez, 9g-11  
 nuclear  
   energía (*consulte* energía nuclear)  
 núcleo, 136, 259

## O

Oersted, Hans Christian, 223  
 Ohm, ley de, 206g-207  
 ohm (unidad), 206g  
 ojo, 256  
 onda  
   de radio, 237-238  
   dualidad partícula/onda, 259  
   electromagnética, 167, 235-236g-239, 246, 249  
   gravitacional, 249-251  
   luz, 236  
   sonido, 238, 259  
   ultravioleta, 238  
 Onnes, Heike Kamerlingh, 226  
 orden de magnitud, 9g  
 Orión, 167

## P

paralelo, 202g  
 partícula, 251-252  
   creación, 254  
   elemental, 251-252, 256-259  
   intercambio, 251  
   subnuclear, 251

pelota curva, 148  
 Penzias, Arno, 254  
 periodo  
   onda, 236, 240  
   orbital, 60, 65  
 peso, 8, 40-43g-44e-106, 119, 121-123, 141, 145, 197  
   atómico, 237  
   caída libre, 24  
   en otros planetas, 64  
   gravedad, 70  
   masa y, 8, 40-43g-44e  
 Piaget, Jean, 76  
 pie (unidad), 6  
 Planck, Max, 246  
   longitud, 252  
 plasma, 136, 141g  
 polarización, 143  
 polo geográfico, 227  
 Pontecorvo, Bruno, 255, 257  
 positrón, 254  
 potencia, 109g-110e  
   energía eléctrica, 213g-239e, 231  
   energía nuclear, 73  
   humana, 109  
   unidad, 109, 213  
 Powell, Asafa, 19  
 precesión, 127  
 presión, 246, 255  
   atmosférica, 141-144  
   cámara de burbujas y cambio de estado, 163  
   efecto de Bernoulli, 146-149  
   en estrellas, 137  
   en fluidos, 141-144  
   en modelo del agua, 205  
   energía oscura, 255-256  
   principio de Arquímedes, 145  
   propiedad macroscópica, 141  
   unidades, 142  
 principio de Arquímedes, 145  
 proporcional, 40g  
   inversamente, 41g  
 protón, 4, 11, 178, 180, 181, 249-258  
   aceleración, 187  
   antiprotón, 258  
   captura de electrón y, 254  
   carga, 180-181-186, 188, 225  
   creación, 253-254, 258  
   desintegración, 252  
   formación de neutrón, 250  
   fuerza eléctrica, 187-188  
   gravitacional, 187-188  
   masa, 187-188  
   quarks y, 254, 258  
   tamaño, 11, 252  
 pulsar, 250  
 punto  
   de ebullición, 163t

## Q

quark, 2, 10, 252-254, 258-259

## R

radar, 249  
 radiación, 155, 164, 250, 254  
   de fondo  
     cósmica, 254-257  
   electromagnética, 167g, 237, 246, 258  
   espectro de, de objetos calientes, 246  
   gravitacional, 251  
   infrarroja, 238  
   microondas, 255  
   no electromagnética, 256  
   ultravioleta, 238  
 radianes, 117  
 radio, 118, 124, 249  
   AM, 238-239  
   cuantizado permitido  
   FM, 238-239  
   onda (*consulte* onda de radio)  
   operación, 238  
 rapidez, 148, 232, 237  
   Apolo, 19  
   Blackbird SR-71A, 19  
   carrera de 100 metros, 19  
   Concorde, 19  
   constante, 21-23, 35  
   de los animales, 19  
   de los planetas, 19  
   de ondas, 237e  
   deriva continental, 19  
   distancia de paro y, 99-100  
   el más lento, 19  
   el más rápido, 19  
   energía cinética y, 95-103  
   instantánea, 18g-28  
   máquinas, 19  
   órbita de la Tierra, 19, 164  
   promedio, 15g-15e-27  
   electrón en un cable, 213  
   rotacional, 117g-118, 124-125  
   unidades, 117  
   terminal, 46g-48, 79  
   transbordador espacial, 19  
   unidad, 17  
   velocidad de la luz, 19, 237, 249-250, 257, 260  
 rayo(s)  
   cósmico, 229, 256-257  
   X, 238, 249  
 razonamiento defectuoso  
   bombillos en serie, 208  
   cambio en brillo de bombillo, 210  
   capacidad térmica, 162  
   carga eléctrica, 182  
   centro de masa, 122  
   choque, 86  
   conservación  
     de la mecánica energía, 104  
     del momento, 83  
   energía gravitacional potencial, 100g-101  
   fuerza(s)  
     de flotación, 146  
     eléctrica, 186  
     neta, 45  
     de la tercera ley, 50  
   gravedad  
     de un cometa, 63  
     en la Luna, 64



índice de calor, 169  
 ley de Lenz, 231  
 onda  
   electromagnética, 236  
 presión, 144  
 rapidez  
   promedio, 21  
 torsión, 121  
 reacción  
   química, 156  
 regla de la mano derecha,  
   117, 223  
 Reina Ana, 37  
 relámpago, 193  
 relatividad  
   especial, 68  
   principio de, 229  
   general, 68, 248-249, 255  
 reloj  
   atómico, 250  
 reproducibilidad, 34  
 repulsión, 179-188, 193, 206,  
   221  
 resistencia de aire. *Consulte*  
   resistencia, aire  
 resistencia, 33  
   aire, 46-47, 87, 148  
   bombillos  
     en paralelo, 209  
     en serie, 208  
   eléctrica, 205-206g-  
     206e-211, 214, 226  
   ley de Ohm, 206g-207  
   materiales diversos, 206  
   unidad, 206  
 resistor, 206, 213  
   símbolo, 213  
 revoluciones, 117  
 Roentgen, Wilhelm, 246  
 rotación  
   aceleración, 117g-120  
   de la Tierra, 15, 65-66,  
     227  
   eje, 117-121, 126  
   energía cinética (*consulte*  
     energía cinética rota-  
     cional)  
   inercia, 120g, 124-126  
   movimiento, 116-117,  
     120-121  
   primera ley de Newton,  
     117-118, 121  
   segunda ley de Newton,  
     120, 121  
   torsión (*consulte* torsión)  
   velocidad, 117g-118, 124,  
     125, 126, 127

## S

sabor  
   de neutrinos, 256-257  
 salto conceptual, 56  
 Schrieffer, J. Robert, 226  
 segundo (unidad), 6  
 sentido común, 4-5, 34, 192  
 sistema  
   aislado, 82, 94, 108, 180  
   Solar, 24  
 slug (unidad), 42  
 solenoide, 223, 233  
 sólido, 135-136, 138g, 141,  
   143, 163  
 estructura, 138

Solovine, Maurice, 3  
 Solución  
   aceleración, 23  
   centrípeta, 61  
   calor específico, 162  
   choque, 85  
   conservación de la energía,  
     97  
   costo de la energía eléctrica,  
     214  
   ¿Debe saltar? 26  
   densidad, 138  
   expansión térmica, 170  
   fuerza gravitacional y eléc-  
     trica, 188  
   gravedad, 63  
   ley de Ohm, 206-207  
   momento, 82  
   peso, 44  
   potencia, 110  
   eléctrica, 213-214  
   rapidez  
     promedio, 18  
   segunda ley, 42  
 sonido, 96, 213  
   onda (*consulte* onda de  
     sonido)  
 superconductividad, 226  
 supernova, 249, 255  
 superposición, 224

## T

tauón  
   neutrino, 256  
 Taylor, Joseph, 250-251  
 telescopio  
   Galileo, 4  
   radiotelescopio, 220  
 temperatura, 246, 252, 254  
   cero absoluto, 160g  
   crítica, 226  
   del Universo, 254  
   descomposición, 136  
   ebullición, 164  
   equivalente, 168  
     absoluta, 160  
     Kelvin, 160  
   fusión, 136  
   resistencia en un cable y,  
     206, 208, 214  
   vaporización, 136  
 tensión, 45  
   superficial, 139  
 teoría  
   BCS, 226  
   color, 252  
   del todo, 252  
   electrodébil, 252  
   gran teoría unificada,  
     252  
   supercadena, 252  
   unificada, 251-252  
 Tereskova, Valentina, 65  
 térmica(o), 166  
   contacto, 158, 161  
   eficiencia, 159  
   energía (*consulte* energía  
     térmica)  
 termodinámica, 157g-158,  
   237, 246  
   ley cero, 158g  
   leyes, 158  
   primera ley, 159-160g

segunda ley, 159g  
 tercera ley, 160g  
 termómetro, 159  
 termonuclear  
   reacción, 257  
 termostato, 170  
 tesla (unidad), 225g  
 Thomson, William (Lord  
   Kelvin), 159  
 tiempo, 15  
   desacelerado, 4  
   reacción, 99  
 Tierra  
   cerca de la superficie, 44,  
     62-64, 187  
   atmósfera, 141-142, 166,  
     168, 256-257  
   auroras, 229  
   cambio de momento, 83  
   campo magnético, 224,  
     227-228  
   centro, 257  
   densidad, 138  
   eje de rotación, 227  
   eje magnético, 227  
   energía cinética, 96, 100  
   estaciones, 161  
   formación, 254  
   gravedad, 26-27  
   mareas, 66-68  
   masa, 62, 83  
   modelo  
     heliocéntrico, 24, 58  
   momento angular, 124  
   movimiento, 15  
   órbita, 100  
   peso, 98  
   polos magnéticos, 227  
   precesión, 127  
   presión del aire en la super-  
     ficie, 141  
   radiación recibida, 167  
   radio, 62  
     orbital, 6  
   rapidez orbital, 19  
   rotación, 15, 65-66, 227  
   torsión sobre la, 126  
   trabajo sobre la, 100  
 Titus de Wittenberg, 5  
 torsión, 117-118g, 127, 182,  
   222, 233  
   ecuación, 118  
   neta, 119-122  
   unidades, 118  
 trabajo, 98g-98e-101  
   calor y, 156-159  
   eléctrico, 192, 205  
   energía  
     cinética y, 98-100  
     interna y, 156, 159-160  
   temperatura y, 156  
   unidad, 98  
 transformador, 214, 231-232

que se acostumbra en  
 EUA, 6-8  
 conversión, 7-8

## V

vacío  
   caída libre y, 24-25, 45  
   ondas electromagnéticas,  
     167  
   propulsión, 87  
 vector, 20g, 25, 47-50, 80-81,  
   117-118, 126,  
   190-191  
   aceleración vectorial, 22,  
     25, 39, 42  
   campo eléctrico, 189-192  
   desplazamiento, 20, 39  
   fuerza, 39, 42  
   impulso, 80-81  
   momento, 81, 83, 86  
     angular, 126  
   rotacional, 117  
   suma, 38-40  
   torsión, 127  
   velocidad, 39  
     promedio, 20  
 velocidad, 20g-27, 38, 45,  
   77, 79-86, 98, 104,  
   146-147  
   aceleración y, 21-22, 40,  
     45  
   choques y, 77  
   constante, 38, 64, 67  
   fuerza magnética y, 228  
   rotacional, 117g, 124-128  
   promedio, 20g-20e  
 viscosidad, 140g  
 visión  
   del mundo, 1-4, 15, 37, 79,  
     201, 259  
   aristotélica, 34  
   creación, 27  
   de la física, 69, 77, 180,  
     189, 229, 246, 249,  
     259, 260  
   de usted, 2  
   moderna, 34, 36  
   newtoniana, 37, 49, 68  
   sentido común, 4, 8, 15,  
     259  
   reduccionista, 258-259  
 Volta, Alessandro, 201-202  
 voltaje, 177, 194, 214, 226,  
   231-233  
   modelo, 210, 211  
   unidad, 194  
 volt (unidad), 194g  
 volumen, 136-140, 145-147,  
   163  
 Von Guericke, Otto, 142  
 Vulovic, Vesna, 81

## W

watt (unidad), 109g, 213  
 watt-hora (unidad), 110  
 Watt, James, 109  
 Weber, Joseph, 249-250  
 Weinberg, Steven, 252  
 Wilson, Robert, 254  
 WIMPs, 255

## U

unidad térmica británica  
 (Btu), 157g  
 unidades  
   SI, 7g-8  
   *consulte también cantidad*  
     *específica*  
 sistema  
   métrico, 6-8



## Constantes físicas

Atomic Mass Unit	$\text{amu} = 1.66 \times 10^{-27} \text{ kg}$
Avogadro's Number	$N_A = 6.02 \times 10^{23} \text{ particles/mol}$
Bohr Radius	$r_1 = 5.29 \times 10^{-11} \text{ m}$
Electron Volt	$\text{eV} = 1.60 \times 10^{-19} \text{ J}$
Elementary Charge	$e = 1.60 \times 10^{-19} \text{ C}$
Coulomb's Constant	$k = 8.99 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2$
Gravitational Constant	$G = 6.67 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{kg}^2$
Mass of Electron	$m_e = 9.11 \times 10^{-31} \text{ kg}$
Mass of Neutron	$m_n = 1.675 \times 10^{-27} \text{ kg}$
Mass of Proton	$m_p = 1.673 \times 10^{-27} \text{ kg}$
Planck's Constant	$h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$
Speed of Light	$c = 3.00 \times 10^8 \text{ m/s}$

---

## Datos físicos

Acceleration due to Gravity	$g = 9.80 \text{ m/s}^2$
Density of Water	$D_w = 1.00 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$
Earth–Moon Distance	$R_{\text{em}} = 3.84 \times 10^8 \text{ m}$
Earth–Sun Distance	$R_{\text{cs}} = 1.50 \times 10^{11} \text{ m}$
Mass of Earth	$M_e = 5.98 \times 10^{24} \text{ kg}$
Mass of Moon	$M_m = 7.36 \times 10^{22} \text{ kg}$
Mass of Sun	$M_s = 1.99 \times 10^{30} \text{ kg}$
Radius of Earth	$R_e = 6.37 \times 10^6 \text{ m}$
Radius of Moon	$R_m = 1.74 \times 10^6 \text{ m}$
Radius of Sun	$R_s = 6.96 \times 10^8 \text{ m}$
Speed of Sound (20°C, 1 atm)	$v_s = 343 \text{ m/s}$
Standard Atmospheric Pressure	$P_{\text{atm}} = 1.01 \times 10^5 \text{ Pa}$

---

## Abreviaturas comunes

A	ampere
amu	atomic mass unit
atm	atmosphere
Btu	British thermal unit
C	coulomb
°C	degree Celsius
cal	calorie
eV	electron volt
°F	degree Fahrenheit
ft	foot
g	gram
h	hour
hp	horsepower
Hz	Hertz
in.	inch
J	joule
K	kelvin
kg	kilogram
lb	pound
m	meter
min	minute
mph	mile per hour
N	newton
Pa	pascal
psi	pound per square inch
rev	revolution
s	second
T	tesla
V	volt
W	watt
$\Omega$	ohm

---

## Factores de conversión

### Tiempo

1 a	=	$3.16 \times 10^7$ s
1 día	=	86 400 s
1 h	=	3600 s

### Longitud

1 pulgada	=	2.54 cm
1 m	=	39.37 pulgadas = 3.281 pies
1 pie	=	0.3048 m
1 km	=	0.621 milla
1 milla	=	1.609 km

### Volumen

1 m <sup>3</sup>	=	35.32 pies <sup>3</sup>
1 pie <sup>3</sup>	=	0.02832 m <sup>3</sup>
1 litro	=	1000 cm <sup>3</sup> = 1.0576 cuartos de galón
1 cuarto de galón	=	0.9455 litro

### Masa

1 ton (métrica)	=	1000 kg
1 uma	=	$1.66 \times 10^{-27}$ kg
1 kg pesa 2.2 libras		
454 g pesan 1 libra		

### Fuerza

1 N	=	0.2248 lb
1 lb	=	4.448 Đ

### Velocidad

1 mph	=	1.609 km/h = 0.447 m/s
1 km/h	=	0.6215 mph
1 m/s	=	3.281 pies/s = 2.237 mph

### Aceleración

1 m/s <sup>2</sup>	=	3.281 pies/s <sup>2</sup>
1 ft/s <sup>2</sup>	=	0.3048 m/s <sup>2</sup>

### Energía

1 J	=	0.738 pie · libra = 0.2389 cal
1 cal	=	4.186 J
1 eV	=	$1.6 \times 10^{-19}$ J
1 kWh	=	$3.6 \times 10^6$ J
931.43 MeV de masa de una uma		

### Potencia

1 W	=	0.738 pie · libra/s
1 caballo de vapor	=	550 pies · libra/s = 0.746 kW

### Presión

1 atm	=	$1.013 \times 10^5$ Pa
1 atm	=	14.7 psi = 76.0 cm Hg

## El alfabeto griego

Alfa	$\alpha$	A	Ny	$\nu$	N
Beta	$\beta$	B	Xi	$\xi$	$\Xi$
Gamma	$\gamma$	Γ	Ómicron	$o$	O
Delta	$\delta$	Δ	Pi	$\pi$	Π
Épsilon	$\varepsilon$	E	Ro	$\rho$	P
Dseta	$\zeta$	Z	Sigma	$\sigma$	Σ
Eta	$\eta$	H	Tau	$\tau$	T
Theta	$\theta$	Θ	Ípsilon	$\upsilon$	Υ
Iota	$\iota$	I	Fi	$\phi$	Φ
Kappa	$\kappa$	K	Ji	$\chi$	X
Lambda	$\lambda$	Λ	Psi	$\psi$	Ψ
My	$\mu$	M	Omega	$\omega$	Ω









## Uso pedagógico del color

Los colores que observa en las ilustraciones de este texto sirven para aumentar la claridad y la comprensión. Se aplicaron diversos colores con aerógrafo en muchas figuras con perspectivas tridimensionales para que tuvieran un aspecto lo más realista posible.

Se ha utilizado el color en diversas partes del libro para identificar cantidades físicas específicas. Se adoptaron los esquemas siguientes.

### Capítulos 1–8: Movimiento

Rapidez y velocidad	
Aceleración	
Fuerza	
Rotación	
Momento lineal	
Momento angular	

### Capítulos 10–12: Electricidad y magnetismo






Carga positiva	
Carga negativa	
Fuerza y campo eléctricos	
Fuerza y campo magnéticos	
Neutrón	

TABLA PERIÓDICA DE LOS ELEMENTOS

1

G

H

Hidrógeno

1.01

3

S

Li

Litio

6.94

4

S

Be

Berilio

9.01

11

S

Na

Sodio

22.99

12

S

Mg

Magnesio

24.31

19

S

K

Potasio

39.10

20

S

Ca

Calcio

40.08

21

S

Sc

Escandio

44.96

22

S

Ti

Titanio

47.90

23

S

V

Vanadio

50.94

24

S

Cr

Cromo

52.00

25

S

Mn

Manganeso

54.94

26

S

Fe

Hierro

55.85

27

S

Co

Cobalto

58.93

28

S

Ni

Níquel

58.71

29

S

Cu

Cobre

63.55

30

S

Zn

Zinc

65.38

31

S

Ga

Gallio

69.72

32

S

Ge

Alemánio

72.59

33

S

As

Arsénico

74.92

34

S

Se

Selenio

78.96

35

L

Br

Bromo

79.90

36

G

Kr

Kriptón

83.80

37

S

Rb

Rubidio

85.47

38

S

Sr

Estroncio

87.62

39

S

Y

Itrio

88.91

40

S

Zr

Circonio

91.22

41

S

Nb

Niobio

92.91

42

S

Mo

Molibdeno

95.94

43

X

Tc

Tecnecio

97

44

S

Ru

Rutenio

101.07

45

S

Rh

Rodio

102.91

46

S

Pd

Paladio

106.4

47

S

Ag

Plata

107.87

48

S

Cd

Cadmio

112.40

49

S

In

Indio

114.82

50

S

Sn

Estañio

118.69

51

S

Sb

Antimonio

121.75

52

S

Te

Telurio

127.60

53

S

I

Yodo

126.90

54

G

Xe

Xenón

131.30

55

S

Cs

Cesio

132.91

56

S

Ba

Bario

137.34

57

S

La

Lantano

138.91

58

S

Ce

Cerio

140.12

59

S

Pr

Praseodimio

140.91

60

S

Nd

Neodimio

144.24

61

X

Pm

Promecio

145

62

S

Sm

Samario

150.4

63

S

Eu

Europio

151.96

64

S

Gd

Gadolinio

157.25

65

S

Tb

Terbio

158.93

66

S

Dy

Disprosio

162.50

67

S

Ho

Holmio

164.93

68

S

Er

Erbio

167.26

69

S

Tm

Tulio

168.93

70

S

Yb

Iterbio

173.04

71

S

Lu

Lutecio

174.97

72

S

Hf

Hafnio

178.49

73

S

Ta

Tantalio

180.95

74

S

W

Volframo

183.85

75

S

Re

Renio

186.21

76

S

Os

Osmio

190.2

77

S

Ir

Iridio

192.22

78

S

Pt

Platino

195.09

79

S

Au

Oro

196.97

80

L

Hg

Mercurio

200.59

81

S

Tl

Talio

204.37

82

S

Pb

Plomo

207.2

83

S

Bi

Bismuto

208.98

84

S

Po

Polonio

209

85

S

At

Astato

210

86

G

Rn

Radón

222

87

S

Fr

Francio

223

88

S

Ra

Radio

226.03

89

S

Ac

Actinio

227

90

S

Th

Torio

232.04

91

S

Pa

Protactinio

231.04

92

S

U

Uranio

238.03

93

X

Np

Neptunio

237.05

94

X

Pu

Plutonio

244

95

X

Am

Americio

243

96

X

Cm

Curio

247

97

X

Bk

Berkelio

247

98

X

Cf

Californio

251

99

X

Es

Einsteinio

254

100

X

Fm

Fermio

257

101

X

Md

Mendelevio

258

102

X

No

Nobelio

259

Estado: 

S

 Sólido 

L

 Líquido 

G

 Gas 

X

 No se encuentra en la naturaleza

Número atómico  
Símbolo  
Número de masa

92

U

Uranio

238.03

Metales

Metales de transición

No metales

Gases nobles

Serie de lantánidos

Serie de actínidos

2

G

He

Helio

4.00

10

G

Ne

Neón

20.18

18

G

Ar

Argón

39.95

3

S

B

Boro

10.81

6

S

C

Carbono

12.01

7

G

N

Nitrógeno

14.01

8

G

O

Oxígeno

16.00

9

G

F

Flúor

19.00

13

S

Al

Aluminio

26.98

14

S

Si

Silicio

28.09

15

S

P

Fósforo

30.97

16

S

S

Enxofre

32.06

17

G

Cl

Cloro

35.45

3

S

B

Boro

10.81

6

S

C

Carbono

12.01

7

G

N

Nitrógeno

14.01

8

G

O

Oxígeno

16.00

9

G

F

Flúor

19.00

10

G

Ne

Neón

20.18

11

S

Na

Sodio

22.99

12

S

Mg

Magnesio

24.31

13

S

Al

Aluminio

26.98

14

S

Si

Silicio

28.09

15

S

P

Fósforo

30.97

16

S

S

Enxofre

32.06

17

G

Cl

Cloro

35.45

18

G

Ar

Argón

39.95

19

S

K

Potasio

39.10

20

S

Ca

Calcio

40.08

21

S

Sc

Escandio

44.96

22

S

Ti

Titanio

47.90

23

S

V

Vanadio

50.94

24

S

Cr

Cromo

52.00

25

S

Mn

Manganeso

54.94

26

S

Fe

Hierro

55.85

27

S

Co

Cobalto

58.93

28

S

Ni

Níquel

58.71

29

S

Cu

Cobre

63.55

30

S

Zn

Zinc

65.38

31

S

Ga

Gallio

69.72

32

S

Ge

Alemánio

72.59

33

S

As

Arsénico

74.92

34

S

Se

Selenio

78.96

35

L

Br

Bromo

79.90

36

G

Kr

Kriptón

83.80

37

S

Rb

Rubidio

85.47

38

S

Sr

Estroncio

87.62

39

S

Y

Itrio

88.91

40

S

Zr

Circonio

91.22

41

S

Nb

Niobio

92.91

42

S

Mo

Molibdeno

95.94

43

X

Tc

Tecnecio

97

44

S

Ru

Rutenio

101.07

45

S

Rh

Rodio

102.91

46

S

Pd

Paladio

106.4

47

S

Ag

Plata

107.87

48

S

Cd

Cadmio

112.40

49

S

In

Indio

114.82

50

S

Sn

Estañio

118.69

51

S

Sb

Antimonio

121.75

52

S

Te

Telurio

127.60

53

S

I

Yodo

126.90

54

G

Xe

Xenón

131.30

55

S

Cs

Cesio

132.91

56

S

Ba

Bario

137.34

57

S

La

Lantano

138.91

58

S

Ce

Cerio

140.12

59

S

Pr

Praseodimio

140.91

60

S

Nd

Neodimio

144.24

61

X

Pm

Promecio

145

62

S

Sm

Samario

150.4

63

S

Eu

Europio

151.96

64

S

Gd

Gadolinio

157.25

65

S

Tb

Terbio

158.93

66

S

Dy

Disprosio

162.50

67

S

Ho

Holmio

164.93

68

S

Er

Erbio

167.26

69

S

Tm

Tulio

168.93

70

S

Yb

Iterbio

173.04

71

S

Lu

Lutecio

174.97

72

S

Hf

Hafnio

178.49

73

S

Ta

Tantalio

180.95

74

S

W

Volframo

183.85

75

S

Re

Renio

186.21

76

S

Os

Osmio

190.2

77

S

Ir

Iridio

192.22

78

S

Pt

Platino

195.09

79

S

Au

Oro

196.97

80

L

Hg

Mercurio

200.59

81

S

Tl

Talio

204.37

82

S

Pb

Plomo

207.2

83

S

Bi

Bismuto

208.98

84

S

Po

Polonio

209

85

S

At

Astato

210

86

G

Rn

Radón

222

87

S

Fr

Francio

223

88

S

Ra

Radio

226.03

89

S

Ac

Actinio

227

90

S

Th

Torio

232.04

91

S

Pa

Protactinio

231.04

92

S

U

Uranio

238.03

93

X

Np

Neptunio

237.05

94

X

Pu

Plutonio

244

95

X

Am

Americio

243

96

X

Cm

Curio

247

97

X

Bk

Berkelio

247

98

X

Cf

Californio

251

99

X

Es

Einsteinio

254

100

X

Fm

Fermio

257

101

X

Md

Mendelevio

258

102

X

No

Nobelio

259

## Notas

[illegible]

## Notas

[illegible]

## Notas

[illegible]



## Notas

[illegible]

## Notas

[illegible]

## Notas

[illegible]

# Explora tu mundo

a través de la mirada de un físico



Considerada como la más fundamental de las ciencias, la física desempeña una función preponderante en prácticamente todo lo que nos rodea, desde la vasta extensión de las estrellas y las galaxias hasta las más diminutas partículas subatómicas: en realidad, todo el universo. *Física: Una mirada al mundo*, edición abreviada, presenta con claridad los conceptos y principios necesarios para comprender cómo se formó la visión del mundo de la física. Con un estilo de redacción accesible que despeja incluso las ideas más abstractas y elusivas, los autores, Larry Kirkpatrick y Gregory Francis, incorporan cuantiosos ejemplos prácticos que exhiben la función de la física en todos los ámbitos.

Las matemáticas sostienen gran parte de la belleza y la fuerza de la física, son la base estructural para la visión del mundo de todos los físicos, es por ello que este texto traduce casi todas las ideas en frases más explicativas y menos complejas.

Diseñada para un curso conceptual de introducción a la física para estudiantes de diferentes campos de las ciencias, las matemáticas o la ingeniería, el objetivo de esta obra es ofrecer una presentación clara y lógica de algunos conceptos y principios básicos de la física en un lenguaje sencillo.